

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

Escuela Politécnica Superior

**Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de
Estructuras**



SIMULACIÓN NUMÉRICA DE INTERACCIÓN FLUIDO-ESTRUCTURA

Proyecto Fin de Carrera

Ingeniería Industrial

Autor:	Jesús Antón Mayoral
Tutor:	José Alfonso Artero Guerrero
Director:	Jesús Pernas Sánchez

Julio 2012

ÍNDICE

<i>CAPÍTULO 1</i>	9
<i>INTRODUCCIÓN</i>	9
1.1 ABSTRACT	10
1.2 OBJETIVO	11
1.3 CÁLCULO NUMÉRICO.....	13
1.4 MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS	14
1.4.1 Breve historia del Método de los Elementos Finitos.	15
1.4.2 Conceptos básicos del Método de los Elementos Finitos.....	16
1.5 MÉTODOS NUMÉRICOS UTILIZADOS.....	19
1.5.1 Método Lagrangiano.	20
1.5.2 Método Euleriano.	21
1.5.3 Método ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian).	22
1.5.4 Método SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics).	25
<i>CAPÍTULO 2</i>	27
<i>ANTECEDENTES</i>	27
2.1 ENSAYO EXPERIMENTAL.....	28
<i>CAPÍTULO 3</i>	35
<i>MODELIZACIÓN</i>	35
3.1 DISEÑO DEL MODELO EN ABAQUS.....	36
3.1.1 Diseño de la cuña.	36
3.1.2 Diseño del agua.	38
3.1.2.1 Método Lagrangiano.....	39
3.1.2.2 Método Euleriano	40
3.1.2.3 Método ALE.....	41
3.1.2.4 Método SPH	42
3.1.3 Diseño del conjunto.	42

3.2	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	44
3.2.1	Método Lagrangiano.....	45
3.2.2	Método Euleriano.....	48
3.2.3	Método ALE.....	57
3.2.4	Método SPH.....	64
3.2.5	Comparativa.....	68
3.2.6	Análisis del impacto.....	74
<i>CAPÍTULO 4.....</i>		<i>78</i>
<i>MODELO APOLLO.....</i>		<i>78</i>
4.1	MOTIVACIÓN.....	79
4.2	ESTUDIOS PREVIOS.....	82
4.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	84
4.3.1	Ensayos verticales.....	84
4.3.2	Ensayo con velocidad combinada (Caso 5).....	89
<i>CAPÍTULO 5.....</i>		<i>93</i>
<i>CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....</i>		<i>93</i>
5.1	CONCLUSIONES.....	94
5.2	LÍNEAS FUTURAS.....	95
<i>CAPÍTULO 6.....</i>		<i>96</i>
<i>PRESUPUESTO DEL PROYECTO.....</i>		<i>96</i>
6.1	PRESUPUESTO DEL PROYECTO.....	97
<i>CAPÍTULO 7.....</i>		<i>99</i>
<i>BIBLIOGRAFÍA DEL PROYECTO.....</i>		<i>99</i>
7.1	BIBLIOGRAFÍA.....	100

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Proceso de discretización de un modelo. [5]</i>	14
<i>Figura 2. Modelo MEF bidimensional. [5]</i>	14
<i>Figura 3. Aplicación del MEF. [5]</i>	15
<i>Figura 4. Condiciones de contorno en el impacto de dos cubos.</i>	17
<i>Figura 5. Mallado en el impacto de dos cubos.</i>	18
<i>Figura 6. Comportamiento mallado Lagrangiano.</i>	20
<i>Figura 7. Comportamiento mallado Euleriano.</i>	21
<i>Figura 8. Comparativa Lagrangiano, Euleriano y ALE (I). [4]</i>	23
<i>Figura 9. Comparativa Lagrangiano, Euleriano y ALE (II).</i>	24
<i>Figura 10. Composición de un cuerpo mediante el método SPH.</i>	26
<i>Figura 11. Equipo utilizado en experimento. [8]</i>	28
<i>Figura 12. Topología del experimento. [8]</i>	29
<i>Figura 13. Morfología de la cuña. [8]</i>	30
<i>Figura 14. Sensor de presión AB/HP. [14]</i>	31
<i>Figura 15. Ficha técnica del potenciómetro. [15]</i>	31
<i>Figura 16. Características del potenciómetro. [15]</i>	32
<i>Figura 17. Evolución de la velocidad de la cuña. [8]</i>	32
<i>Figura 18. Detalle velocidad tras impacto. [8]</i>	33
<i>Figura 19. Evolución de las presiones. [8]</i>	34
<i>Figura 20. Geometría de la cuña.</i>	37
<i>Figura 21. Geometría del agua.</i>	38
<i>Figura 22. Modelado del agua por el método Euleriano.</i>	40
<i>Figura 23. Modelado del agua por el método ALE.</i>	41
<i>Figura 24. Montaje de la cuña con el agua.</i>	43
<i>Figura 25. Distorsión del modelo Lagrangiano.</i>	46
<i>Figura 26. Velocidad de la cuña según modelo Lagrangiano.</i>	47
<i>Figura 27. Error relativo en la velocidad de la cuña con el método Euleriano. ..</i>	48
<i>Figura 28. Presiones máximas en la cuña del método Euleriano.</i>	50
<i>Figura 29. Error relativo en los picos de presión con el método Euleriano.....</i>	51
<i>Figura 30. Error relativo en los tiempos de pico con el método Euleriano.</i>	52
<i>Figura 31. Modelo Euleriano con malla fina.....</i>	53
<i>Figura 32. Velocidad de la cuña para el modelo Euleriano y el experimental....</i>	54

<i>Figura 33. Presiones experimentales.</i>	55
<i>Figura 34. Presiones del método Euleriano.</i>	56
<i>Figura 35. Error relativo en la velocidad de la cuña con el método ALE.</i>	57
<i>Figura 36. Presiones máximas en la cuña del método ALE.</i>	58
<i>Figura 37. Error relativo en los picos de presión con el método ALE.</i>	59
<i>Figura 38. Error relativo en los tiempos de pico con el método ALE.</i>	60
<i>Figura 39. Modelo ALE con malla fina.</i>	61
<i>Figura 40. Velocidad de la cuña para el modelo ALE y el experimental.</i>	61
<i>Figura 41. Presiones experimentales.</i>	62
<i>Figura 42. Presiones del método ALE.</i>	63
<i>Figura 43. Error relativo en la velocidad de la cuña con el método SPH.</i>	64
<i>Figura 44. Presiones máximas en la cuña del método SPH.</i>	65
<i>Figura 45. Error relativo en los picos de presión con el método SPH.</i>	66
<i>Figura 46. Error relativo en los tiempos de pico con el método SPH.</i>	66
<i>Figura 47. Ensayo grueso del modelo SPH.</i>	67
<i>Figura 48. Comparativa del error relativo en la velocidad de la cuña.</i>	68
<i>Figura 49. Comparativa de la media del error en la velocidad de la cuña.</i>	69
<i>Figura 50. Comparativa del error relativo en los picos de presión.</i>	69
<i>Figura 51. Comparativa de la media del error relativo en los picos de presión.</i>	70
<i>Figura 52. Comparativa del error relativo en los tiempos de pico.</i>	70
<i>Figura 53. Comparativa de la media del error relativo en los tiempos de pico.</i>	71
<i>Figura 54. Comparativa del tiempo de computación.</i>	73
<i>Figura 55. Evolución lateral del impacto del caso ALE fino.</i>	74
<i>Figura 56. Evolución posterior del impacto del caso ALE fino.</i>	75
<i>Figura 57. Evolución lateral del impacto de placa de aluminio. [17]</i>	76
<i>Figura 58. Evolución onda de presión del caso ALE fino.</i>	77
<i>Figura 59. Transbordador Atlantis.</i>	79
<i>Figura 60. Cápsula Dragón C2 antes y después de la misión espacial.</i>	80
<i>Figura 61. Cápsula Apollo.</i>	80
<i>Figura 62. Cápsula Orión entrando en la atmósfera.</i>	81
<i>Figura 63. Geometría de la cápsula Apollo. [10]</i>	82
<i>Figura 64. Sistema de coordenadas local Apollo. [9]</i>	83

<i>Figura 65. Posición inicial del Caso 3.</i>	<i>85</i>
<i>Figura 66. Posición final del Caso 3.</i>	<i>85</i>
<i>Figura 67. Evolución de la aceleración normal con el ángulo de caída.</i>	<i>86</i>
<i>Figura 68. Evolución de la aceleración longitudinal con el ángulo de caída.</i>	<i>87</i>
<i>Figura 69. Evolución de la aceleración angular con el ángulo de caída.</i>	<i>87</i>
<i>Figura 70. Posición de los tripulantes en la cápsula. [10].....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 71. Posición inicial del Caso 5.</i>	<i>89</i>
<i>Figura 72. Posición final del Caso 5.</i>	<i>90</i>
<i>Figura 73. Aceleración normal de las cinco simulaciones.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 74. Aceleración longitudinal de las cinco simulaciones.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 75. Aceleración angular de las cinco simulaciones.....</i>	<i>92</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Elementos del método Euleriano.</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 2. Elementos del método ALE.</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 3. Elementos del método SPH.</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 4. Tabla tiempo de computación.</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 5. Tabla resumen.</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 6. Tabla de resultados previos cápsula Apollo.</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 7. Tabla de resultados de los cuatro experimentos verticales.</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 8. Tabla resumen error relativo.</i>	<i>89</i>
<i>Tabla 9. Tabla de resultados del Caso 5.</i>	<i>91</i>
<i>Tabla 10. Presupuesto del proyecto.</i>	<i>98</i>

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN



1.1 ABSTRACT

This project is framed within the study of fluid-structure interaction, one of the newest challenges for computational methods. The main goal of the project is to analyze different numerical methods that can manage this kind of problems. Results obtained from experimental tests will be used to compare and validate the numerical methods utilized in the commercial finite element code ABAQUS/Explicit.

The first method is the Lagrangian, typically used for solid simulations due to the mesh movement is joined to the material movement. However we should expect an inaccurate result because we are going to apply it to a fluid, which will suffer large deformations. This will make the mesh will be distorted significantly with the consequences this may entail. The second one is the Eulerian method, in which the mesh is fixed and the material flows through it. ALE method, which is an intermediate case between the previous ones, where the mesh is deformed adapting to the material movement. Finally, we will use the SPH method, the newest of four ones, which consists in a meshless method.

The experimental test will consist on simulating a vertical impact of a wedge of wood into a water tank and analyze the results obtained with each of the four methods. The experimental trial than we will use to compare the results was conducted by El-Mahdi Yettou, Alain Desrochers e Yvan Champoux at the University of Sherbrooke (Quebec, Canada) [8]. In order to get reliable values, the simulation will reproduce as faithfully as possible the same conditions that experiment ones.

Among other variables to be analyzed we can highlight the contact pressures appearing in the wedge as a result of impact with the water, and the speed of the wedge when it comes into contact with the fluid. With all this information we will make a detailed study of the four methods.

In the end we will apply all the previous knowledge to simulate a real case. This will consist on studying the behavior of the water landing of Apollo capsule. We will use the best numerical method to compare the simulation results with an experimental trial. The comparison will be made using the acceleration.

1.2 OBJETIVO

El presente proyecto se encuentra enmarcado dentro del estudio de la interacción fluido-estructura mediante técnicas de cálculo numérico, uno de los retos más novedosos para la simulación por ordenador. Los objetivos buscados son:

1. Valorar de forma objetiva los diferentes métodos numéricos analizando las ventajas y desventajas de cada uno de ellos en la simulación de este tipo de problemas.
2. Elegir razonadamente el método numérico que mejores resultados ofrece para la simulación del problema concreto.
3. A partir de la experiencia obtenida de los puntos anteriores simular un caso real, el cual consistirá en el amerizaje de la cápsula Apollo.

El primer método que se usará es el Lagrangiano, típicamente utilizado para realizar simulaciones de la mecánica de sólidos, y que se caracteriza porque la malla se mueve de forma solidaria al material. Dicho esto cabe esperar que su comportamiento no sea el idóneo ya que al aplicarlo a un fluido, el cual va a sufrir grandes deformaciones, la malla se distorsionará notablemente produciéndose inestabilidades numéricas. En segundo lugar está el método Euleriano, en el que la malla permanece fija y el material fluye a través de ella. El método ALE, que es un caso intermedio entre los anteriores, donde la malla se desplaza parcialmente adaptándose a las deformaciones del material. Y por último el método SPH, distinto a los anteriores por tratarse de un método sin malla.

Para aplicar los cuatro métodos mencionados se simulará mediante el código comercial Abaqus el impacto vertical de una cuña de madera contra un depósito de agua y se analizarán los resultados obtenidos con cada uno de ellos. Dichas simulaciones se basarán en un ensayo experimental llevado a cabo por la Universidad de Sherbrooke (Québec, Canadá) [8] de forma que los resultados puedan ser contrastados. Para que los resultados de la comparación sean fiables las simulaciones se han hecho intentando reproducir con la mayor fidelidad posible las condiciones reales en que fue realizado el experimento.

Las variables que se analizarán serán las presiones de contacto que se generan en la cuña como consecuencia del impacto contra el agua, así como la velocidad de frenado de la cuña una vez entra en contacto con el fluido. Con ésta y con otra información se realizará un estudio pormenorizado de los cuatro métodos.

Por último se realizará la simulación de un caso real con gran aplicación práctica, el amerizaje controlado de la cápsula Apollo. Se estudiarán las aceleraciones que se producen como consecuencia del impacto y se valorarán sus posibles efectos.

1.3 CÁLCULO NUMÉRICO

El análisis numérico o cálculo numérico es una técnica que busca la resolución de problemas complejos mediante el uso de algoritmos matemáticos. Así se pueden resolver problemas que analíticamente no tienen solución. Gracias al aumento de la capacidad de cálculo computacional de los ordenadores estos métodos están cobrando cada vez una mayor importancia.

Dichos métodos numéricos se caracterizan por utilizar algoritmos iterativos que obtienen una solución aproximada del problema; por esta razón es fundamental conocer las ventajas y limitaciones de los diferentes métodos, en relación a temas como error, exactitud, precisión o estabilidad, a fin de utilizar el método más apropiado en cada situación particular.

1.4 MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

El método de los elementos finitos (MEF) es una técnica de cálculo numérico para la resolución de problemas que permite la obtención de una solución aproximada mediante la convergencia del problema a la solución real.

La idea principal del método consiste en dividir un sistema continuo en un número finito de elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos (fig.1).

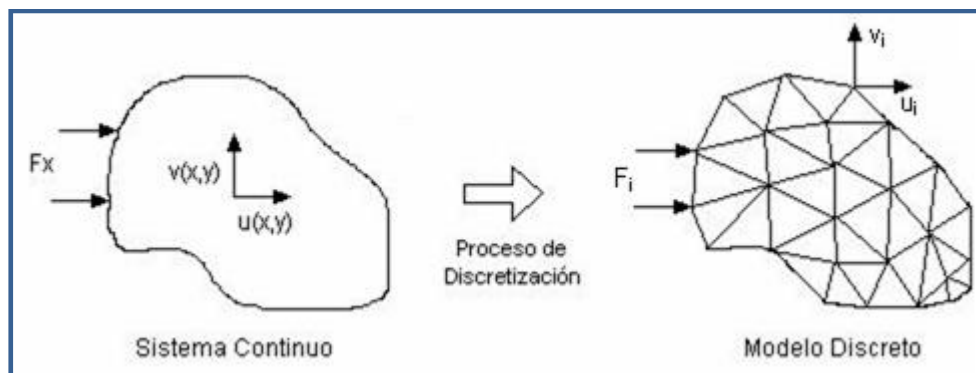


Figura 1. Proceso de discretización de un modelo. [5]

Al discretizar el sistema continuo se obtiene el modelo MEF (fig.2), que no es más que la representación matemática de un sistema físico [5].

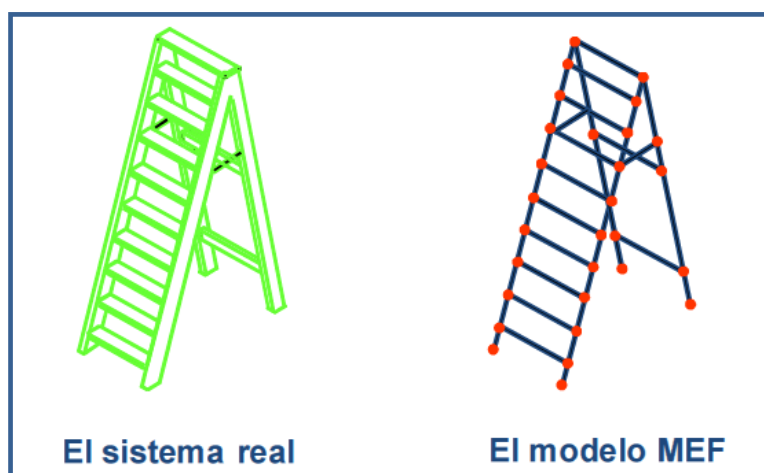


Figura 2. Modelo MEF bidimensional. [5]

1.4.1 Breve historia del Método de los Elementos Finitos.

Aunque la idea de la discretización era conocida desde antiguo, pues los egipcios ya la empleaban para calcular el volumen de las pirámides, su desarrollo tal y como se conoce hoy no llegó hasta mediados del siglo XX con la evolución del sector aeroespacial.

En 1943 Richard Courant propone la utilización de funciones polinómicas para la formulación de problemas elásticos en subregiones triangulares [7].

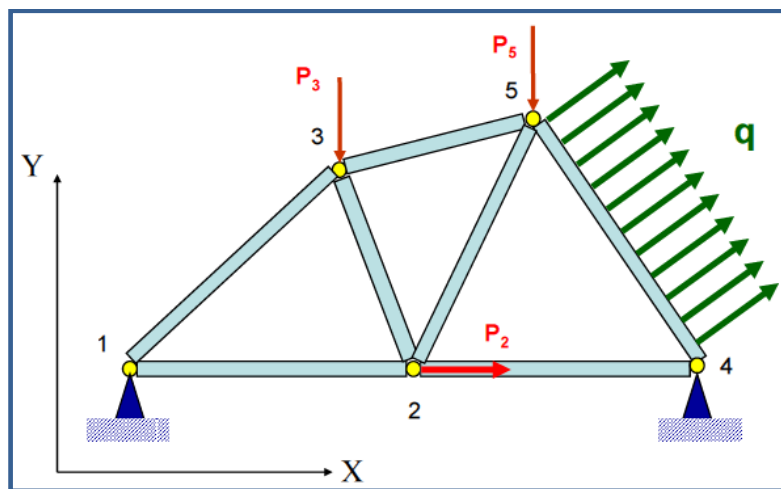


Figura 3. Aplicación del MEF. [5]

Ya en las décadas de los 60 y 70 crecieron las aplicaciones prácticas del MEF (fig.3), y con ellas los requerimientos de capacidad de cálculo y memoria de los ordenadores. Surgía así la necesidad de hacer más efectivos los métodos de cálculo tradicional con el desarrollo de algoritmos más eficientes. Este desarrollo se hizo especialmente notable en estructuras de edificación donde la discretización de los pórticos en barras es prácticamente inmediata a partir de las vigas y los pilares.

Sin embargo, esta modelización de elementos mediante barras era insuficiente en estructuras continuas (superficies y volúmenes) y con geometrías complejas, por lo que no sería hasta la llegada del desarrollo en el campo aeroespacial cuando empezaran a evolucionar las nuevas técnicas del MEF. Dada la generalidad del método se amplió a otros campos no estructurales como la conducción de calor, el electromagnetismo, etc.

A partir de la década de los 80, con la generalización de los ordenadores personales, se extiende el uso de los programas comerciales que se especializan en los diversos campos, instaurándose el uso de pre y postprocesadores que permiten realizar desde el diseño de la estructura, o su mallado, hasta la representación gráfica de los resultados.

Hoy en día ya se concibe la conexión inteligente entre las técnicas de análisis estructural, las técnicas de diseño (CAD) y las técnicas de fabricación.

1.4.2 Conceptos básicos del Método de los Elementos Finitos.

Como ya se comentó con anterioridad, la idea principal del método de los elementos finitos se basa en la división de un continuo en un conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos, es decir, en aproximar un problema continuo a uno discreto que seamos capaces de resolver.

Las ecuaciones que rigen el comportamiento del continuo regirán también el del problema discretizado. De esta forma se consigue pasar de un sistema continuo con infinitos grados de libertad, que es regido por una ecuación diferencial o un sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema con un número finito de grados de libertad cuyo comportamiento se modela por un sistema de ecuaciones, lineales o no [6]. Con ello se consigue pasar de un sistema de ecuaciones diferenciales a otro con ecuaciones algebraicas.

Al discretizar el modelo se consigue una simplificación del problema original en contra de obtener un elevado número de incógnitas, inabarcable para el cálculo manual, pero muy efectivo para el cálculo computacional.

En cualquier sistema a modelar mediante el método de los elementos finitos es necesario tener claros los siguientes conceptos [7]:

- Dominio: espacio geométrico donde se va a analizar el sistema. Es el modelo continuo cuyo comportamiento se quiere estudiar, y el cual se dividirá en múltiples elementos.
- Condiciones de contorno: variables conocidas y que van a condicionar el comportamiento del sistema. Estas variables pueden ser de muy diferente índole según el tipo de problema: cargas mecánicas, desplazamientos, restricciones de movimiento, temperaturas, voltaje, focos de calor,...

Como el problema que ocupa este proyecto es de tipo estructural, las condiciones de contorno que se tendrán serán de carácter mecánico. De este modo en la *figura 4* se aprecian imposiciones mecánicas (cubo izquierdo) así como de desplazamiento (cubo derecho).

- Incógnitas: son las variables que se desean conocer después de que las condiciones de contorno hayan actuado sobre el sistema. Al igual que ocurría con éstas, las incógnitas que se obtienen dependen del tipo de problema: desplazamientos, deformaciones, tensiones, temperaturas,...

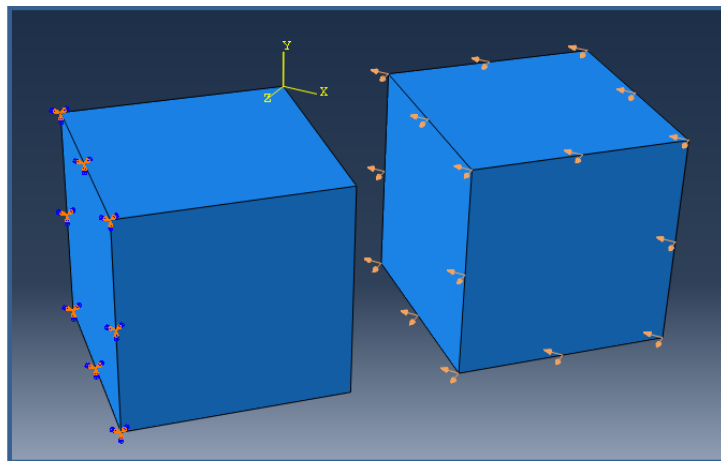


Figura 4. Condiciones de contorno en el impacto de dos cubos.

El método de los elementos finitos supone el dominio discretizado en subdominios ficticios denominados elementos, los cuales forman la malla (*fig.5*). Los elementos se definen por un número discreto de puntos, llamados nodos, que conectan entre sí los elementos. Sobre estos nodos se obtienen las incógnitas fundamentales del problema.

En el caso de elementos estructurales estas incógnitas son los desplazamientos nodales, ya que a partir de ellos se podrán calcular el resto de variables de interés: deformaciones, tensiones...

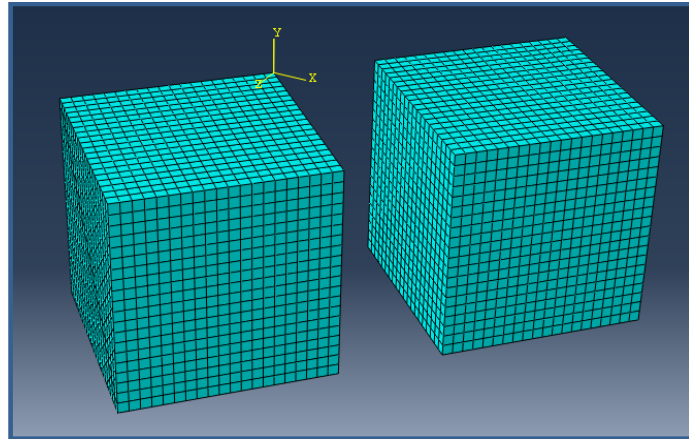


Figura 5. Mallado en el impacto de dos cubos.

Las incógnitas del problema dejan de ser funciones continuas para tomar los valores discretos que adquieren en los nodos, de forma que el comportamiento en el interior de cada elemento vendrá dado por la interpolación de los valores en los nodos mediante las funciones de forma propias del elemento.

1.5 MÉTODOS NUMÉRICOS UTILIZADOS

A día de hoy los métodos numéricos constituyen una potente herramienta de cálculo para resolver todo tipo de problemas, tanto en el ámbito de la mecánica de sólidos como en de la mecánica de fluidos.

Mientras que dentro de la mecánica de sólidos el método de los elementos finitos es el más asentado dada su robustez y precisión, en la mecánica de fluidos son otros como las diferencias finitas o el método de los volúmenes finitos los más utilizados. Sin embargo, aunque a veces se desprecie la interacción entre los cuerpos sólidos y fluidos no siempre es desdeñable, y en ocasiones estas interacciones fluido-estructura deben ser estudiadas. A la hora de combinar ambos problemas la complejidad es aún mayor.

A continuación se pasarán a detallar las características generales de los distintos métodos que se aplicarán a posteriori en la simulación para poder entender mejor sus características y su forma de trabajar.

1.5.1 Método Lagrangiano.

El primero de los métodos que se van a estudiar es el Lagrangiano, cuya característica principal es el hecho de que la malla está en todo momento fija al material [3]. Cuando se realiza el mallado del sistema cada nodo queda inmediatamente asignado a un punto material, y dicha asignación no va a cambiar a lo largo de todo el análisis.

Esto supone que la malla y el material son solidarios, de forma que cuando las condiciones de contorno actúen y se produzca la deformación del sólido la malla va a hacer lo propio (*fig.6*).

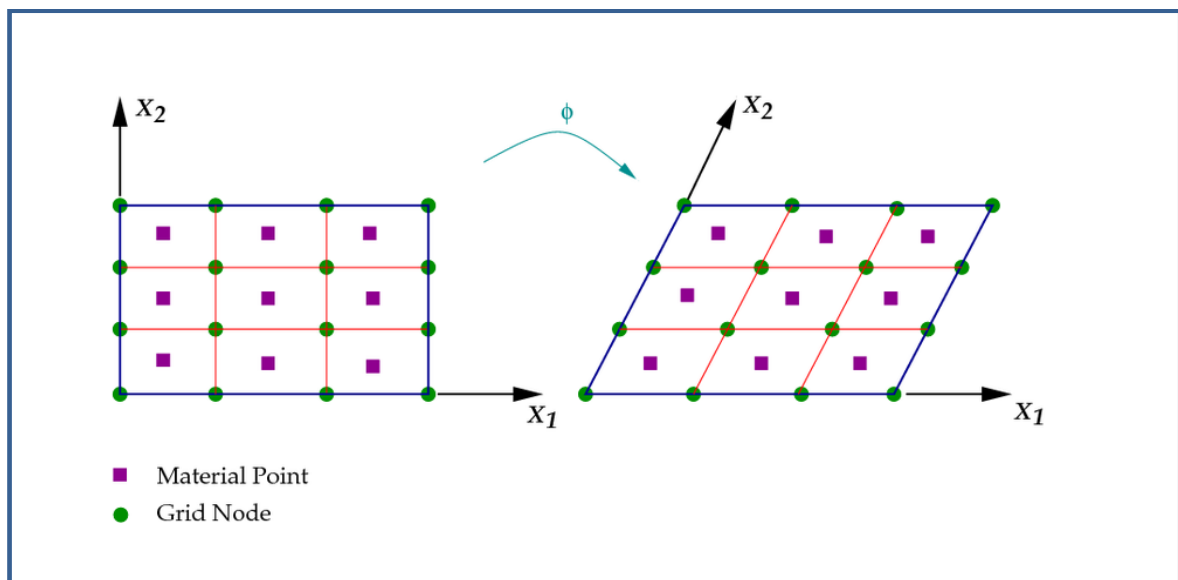


Figura 6. Comportamiento mallado Lagrangiano.

En la imagen anterior se observa la forma de operar del método, por la cual al deformarse el cuerpo (en azul) la malla (en naranja) también se deforma siguiendo el material.

El método Lagrangiano es el más utilizado para resolver problemas de la mecánica de sólidos, porque las deformaciones que van a sufrir los cuerpos van a ser pequeñas. Sin embargo cuando se trata de fluidos las deformaciones que se producen son grandes, lo que va a dar lugar a una fuerte distorsión de la malla. En estos casos el método no es apropiado porque la distorsión de malla amplifica el error numérico y los resultados que se van a obtener serán incorrectos.

Ante esta limitación del método Lagrangiano surge la necesidad de buscar otras alternativas para poder realizar simulaciones de problemas expuestos a grandes deformaciones. Este es el caso del método Euleriano, el ALE o el SPH que se explican a continuación.

1.5.2 Método Euleriano.

El Euleriano es otro método numérico que sirve como alternativa a las carencias del ya explicado Lagrangiano. La característica fundamental que define al método Euleriano radica en que el mallado permanece fijo en el espacio y es el material el que fluye a través de él, en contra de lo que sucedía en el Lagrangiano donde malla y material estaban unidos [3].

De este modo, cuando el análisis del problema vaya evolucionando y el cuerpo comience a desplazarse o a deformarse a causa de una sollicitación externa, el material se extenderá por zonas de malla que estaban inicialmente vacías, y del mismo modo, habrá zonas inicialmente ocupadas que tras la deformación queden libres de materia (fig.7). Es por ello que el tamaño de la malla en un análisis Euleriano será más grande que el propio cuerpo al que está mallando, con el sobre coste computacional que esto supone.

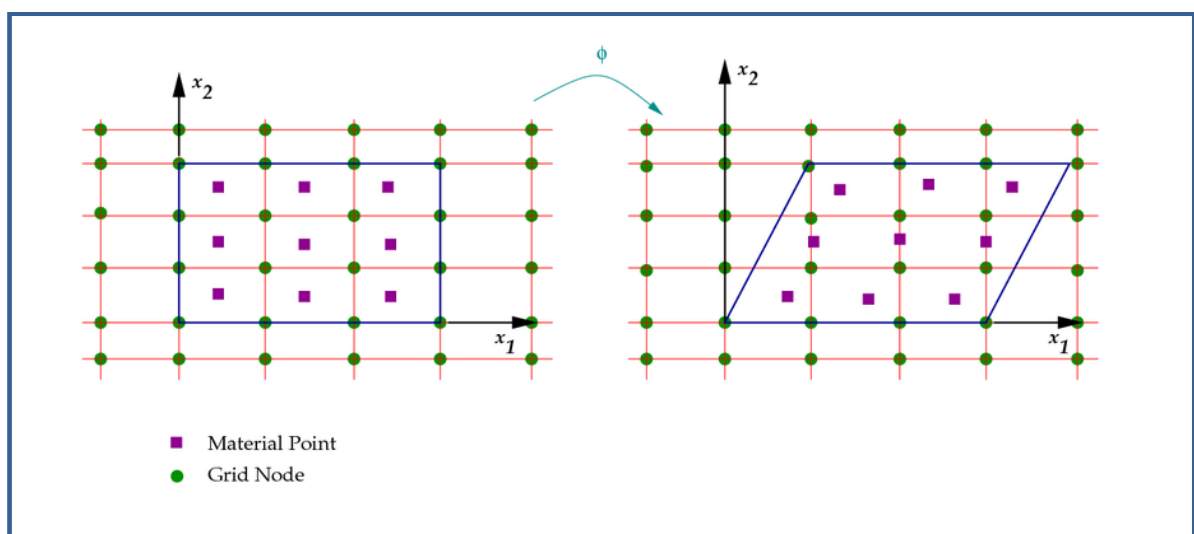


Figura 7. Comportamiento mallado Euleriano.

En la imagen superior se observa lo explicado anteriormente, es decir, como la malla (en naranja) envuelve un espacio superior al del propio cuerpo (en azul), y cuando éste se deforma pasa a ocupar una zona inicialmente vacía sin que la malla sufra distorsión alguna.

El hecho de que la malla no se deforme es la gran ventaja del método Euleriano frente al Lagrangiano, pues lo hace idóneo para ser aplicado en problemas con grandes deformaciones como impactos de sólidos o interacciones con fluidos.

En contra, como punto negativo de este método hay que destacar que a causa de la separación entre el movimiento del material y la malla los términos convectivos no se anulan, añadiendo una mayor complejidad al sistema [4]. Esta aparición de los términos convectivos genera unos algoritmos más complejos que se traducen en un mayor coste computacional.

El aumento del coste computacional se ve también agravado por la necesidad de realizar una malla euleriana más grande para que el material pueda fluir a través de ella. Por ello es fundamental llegar a un compromiso entre el tamaño total de la malla, el tamaño de los elementos y las posibles fugas de material que se pudieran tener; ya que todo ello va a influir fuertemente en el coste computacional, y en consecuencia, en el tiempo de cálculo.

1.5.3 Método ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian).

El tercer método, llamado Arbitrary Lagrangian Eulerian, y más conocido por sus siglas, ALE, surge para tratar de sobreponerse a las carencias de los dos métodos anteriores combinando los beneficios de ambos [3]. Esto es, capacidad de simular problemas expuestos a grandes deformaciones con un coste computacional adecuado.

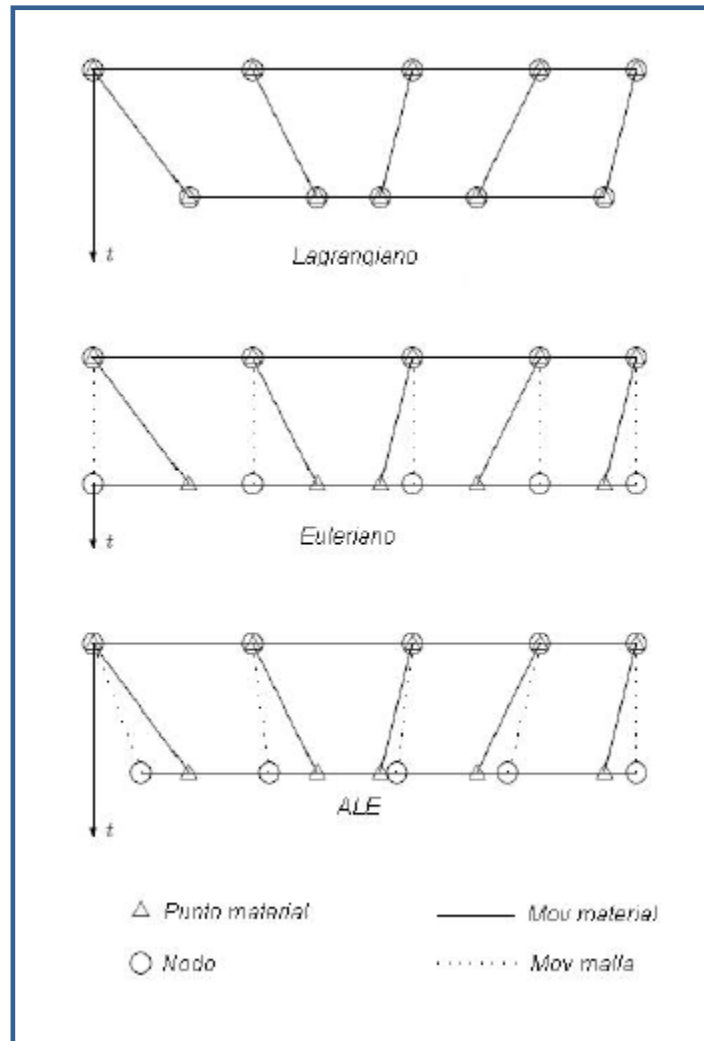


Figura 8. Comparativa Lagrangiano, Euleriano y ALE (I). [4]

En la imagen anterior (*fig.8*) se aprecia la forma de operar de los distintos métodos vistos hasta ahora. La ilustración recoge como queda la malla en cada uno de ellos después de que el cuerpo haya sido deformado. La malla Lagrangiana queda deformada igual que el material, quedando cada nodo asignado a su punto material inicial. En el Euleriano la malla queda intacta frente a la deformación del sólido ya que el cuerpo sólo fluye a través de ella, mientras que en el ALE se puede apreciar como es un caso intermedio, donde la malla se deforma ligeramente para seguir el movimiento del material y adaptarse a él.

En la siguiente figura (*fig.9*) se muestra otra comparativa similar de los tres métodos. Es interesante ver como la malla del ALE se recalcula para adaptarse a la nueva posición del material.

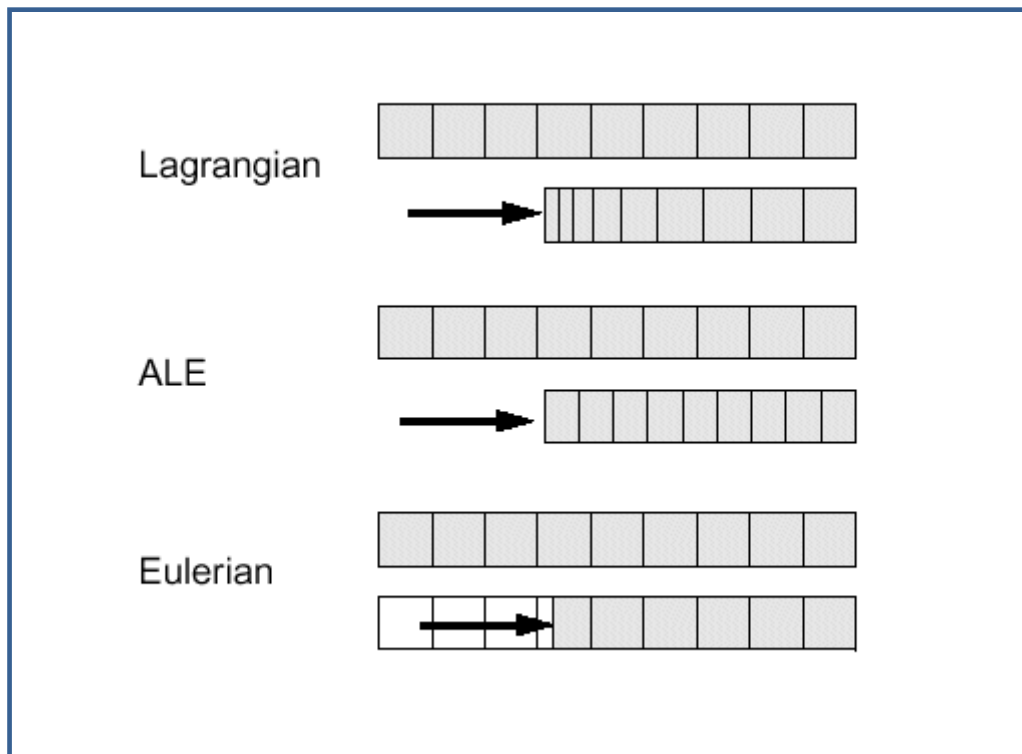


Figura 9. Comparativa Lagrangiano, Euleriano y ALE (II).

Una de las características propias del ALE es que se puede definir el movimiento de la malla de modo que se adecúe a cada problema en particular. Con ello se consigue una optimización del mallado superior a la que se tenía en el Euleriano, donde era necesario mallar todo el espacio por el que se esperaba que se fuera a mover el material. Esto produce un ahorro computacional importante. Sin embargo es importante que los algoritmos que deben recalculan el mallado en cada incremento temporal sean eficientes, y de ello va a depender en gran medida el éxito del método.

Existen dos criterios para definir el movimiento de la malla [4]. En el primero se busca mantener la malla lo más regular posible evitando la distorsión de los elementos que pueda introducir error numérico a la solución; mientras que el segundo trata de optimizar la malla refinándola en las zonas de mayor interés. Sin embargo este refinamiento no se consigue añadiendo más nodos sino desplazándolos, lo que da una buena precisión a un bajo coste computacional.

Por último destacar que la formulación ALE apareció inicialmente en los métodos de diferencias finitas y de los volúmenes finitos y fue más tarde cuando se introdujo en el método de los elementos finitos.

1.5.4 Método SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics).

El último de los métodos numéricos que se recogen en este proyecto es el Smoothed Particle Hydrodynamic (SPH). Éste es un método diferente a todos los vistos anteriormente ya que se trata de un método sin malla en el que la interacción entre los elementos se establece con funciones interpoladoras que no dependen del mallado [6].

El SPH fue desarrollado originalmente para la simulación de problemas del ámbito de la astrofísica a finales de los años setenta y su utilidad fue demostrada en diversos trabajos incluyendo simulaciones de colisiones estelares, formación de galaxias y agujeros negros e incluso la evolución del universo. Con el paso de los años las áreas de aplicación del método fueron creciendo hasta llegar a establecerse en la mecánica de fluidos debido a la sencillez de formulación y la habilidad de incorporar complicados efectos físicos que de otra manera serían muy difíciles de simular.

La idea del método consiste en simular los cuerpos mediante partículas con masa (*fig.10*), es decir, se representa un medio continuo mediante partículas discretas. La masa total del conjunto quedará dividida entre el número total de partículas que lo formen.

Se apoya en la formulación Lagrangiana pero evitando el problema del error numérico provocado por la distorsión de malla cuando el material se expone a grandes deformaciones.

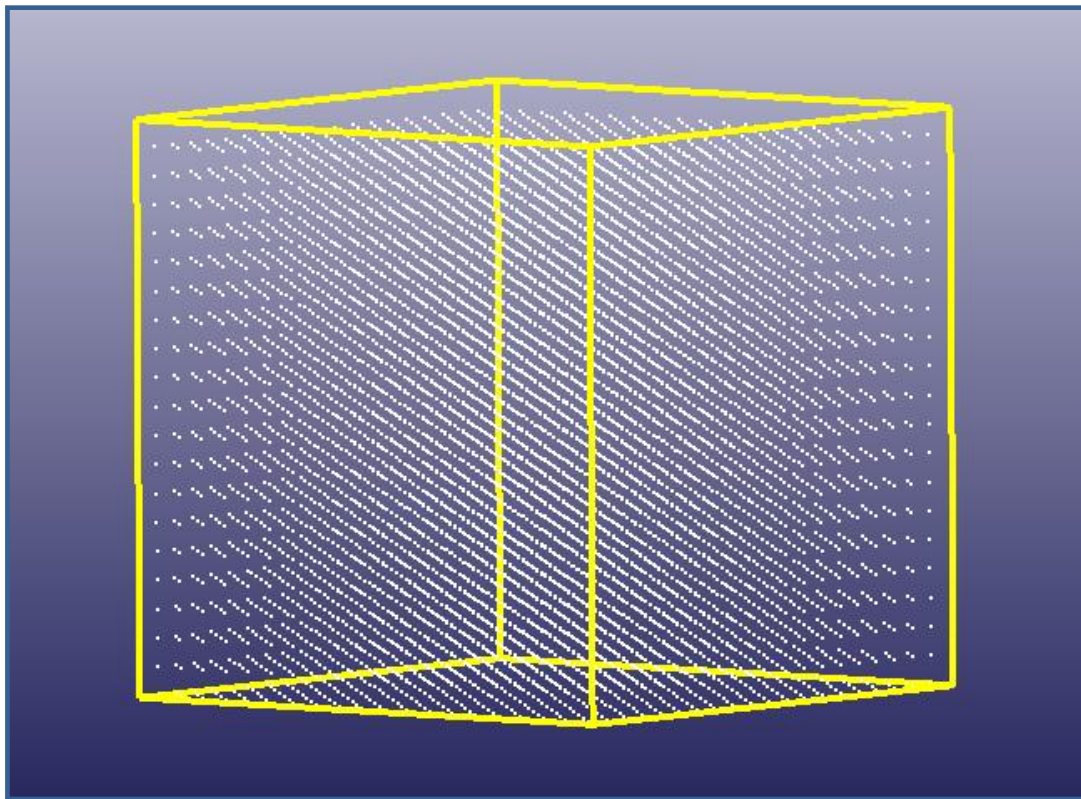


Figura 10. Composición de un cuerpo mediante el método SPH.

Las partículas SPH se asemejan a un círculo (2D) o a una esfera (3D) que quedan definidas por dos parámetros: su centro y su radio. El centro proporciona la información de su posición o velocidad y el radio sobre la densidad y la deformación de la partícula. Esto supone una gran ventaja para el método, pues en situaciones donde los desplazamientos y deformaciones sean elevados, como por ejemplo la fragmentación de un material, el cálculo computacional sólo está contenido en el espacio que ocupa la materia y no en todo el espacio computacional [4].

De este modo las ecuaciones diferenciales que definen el movimiento del cuerpo se van resolviendo a medida que las partículas se van moviendo por el espacio ya que son ellas mismas las que llevan toda la información computacional. Por ello el SPH maneja con gran éxito los problemas con altas deformaciones, haciéndolo idóneo para la simulación de materiales con comportamiento fluido.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

2.1 ENSAYO EXPERIMENTAL

Todo proyecto en ingeniería es necesario que se fundamente en alguna teoría con la cual poder contrastar los resultados obtenidos, de forma que se pueda cuantificar el éxito de los objetivos marcados inicialmente.

En el caso concreto de este proyecto, en el que se pretende estudiar el comportamiento ante una interacción fluido-estructura mediante diferentes métodos numéricos, la fuente en que se ha basado ha sido un ensayo experimental de la Universidad de Sherbrooke (Québec, Canadá) realizado por El-Mahdi Yettou, Alain Desrochers e Yvan Champoux [8].



Figura 11. Equipo utilizado en experimento. [8]

Dicho ensayo, recogido bajo el título “*Experimental study on the water impact of a symmetrical wedge*”, consiste en el impacto vertical por caída libre de una cuña simétrica de madera contra un depósito de agua (fig.11).

Como se ha comentado el experimento consiste en el impacto de una cuña de madera contra un depósito lleno de agua. Para conseguir una caída totalmente vertical se ancló un mástil al fondo del depósito, el cual tenía unas dimensiones de 2 m de ancho por 30 m de longitud con una profundidad de 2 m, aunque el nivel de agua se mantuvo en 1 m.

La posición del mástil era perfectamente perpendicular a la superficie del depósito. Además la cuña estaba unida a una estructura de acero que deslizaba sobre el mástil. Un esquema del montaje experimental se puede apreciar en la siguiente figura (fig.12) recogida en el artículo [8].

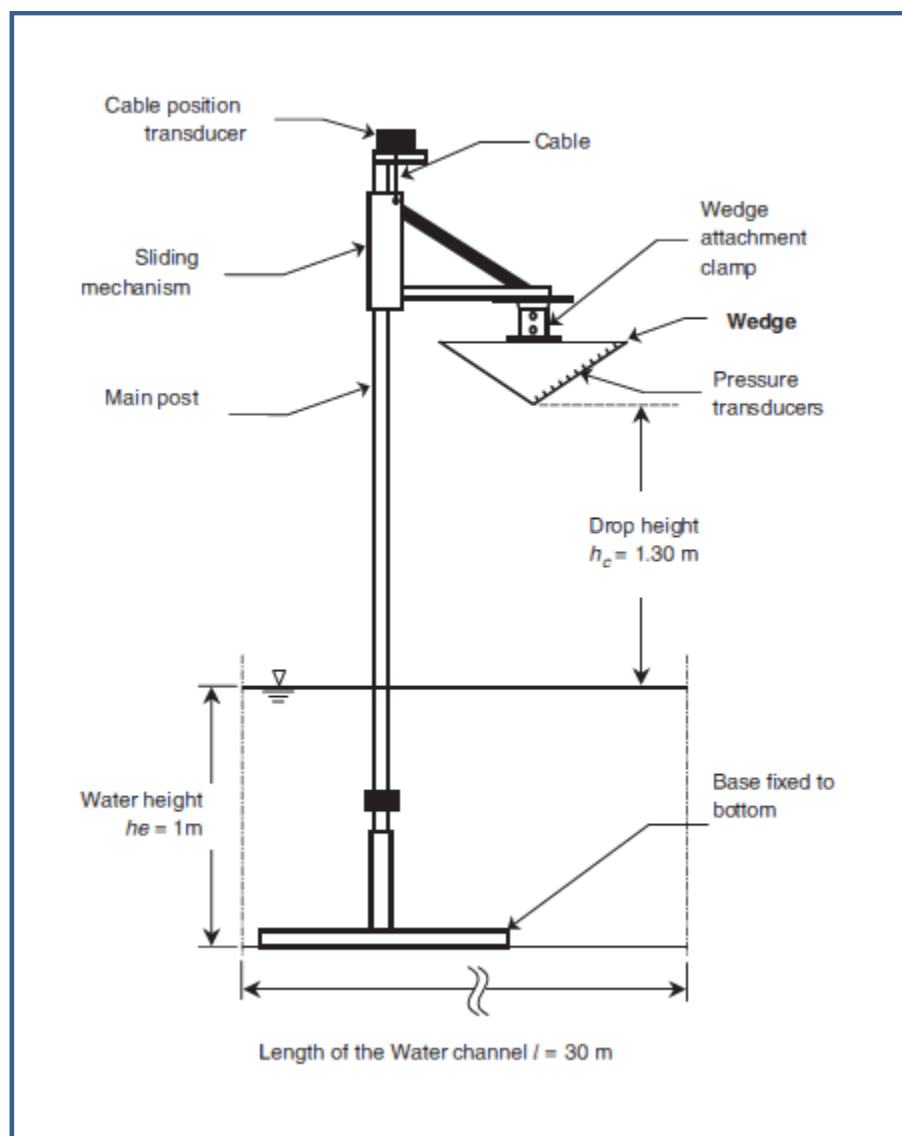


Figura 12. Topología del experimento. [8]

Por su parte la cuña de madera tenía una morfología simétrica (algo que a posteriori será una gran ventaja para el diseño por ordenador) con una superficie cuadrada de 1,2 m de lado y un ángulo de ataque $\theta = 25^\circ$ (fig.13).

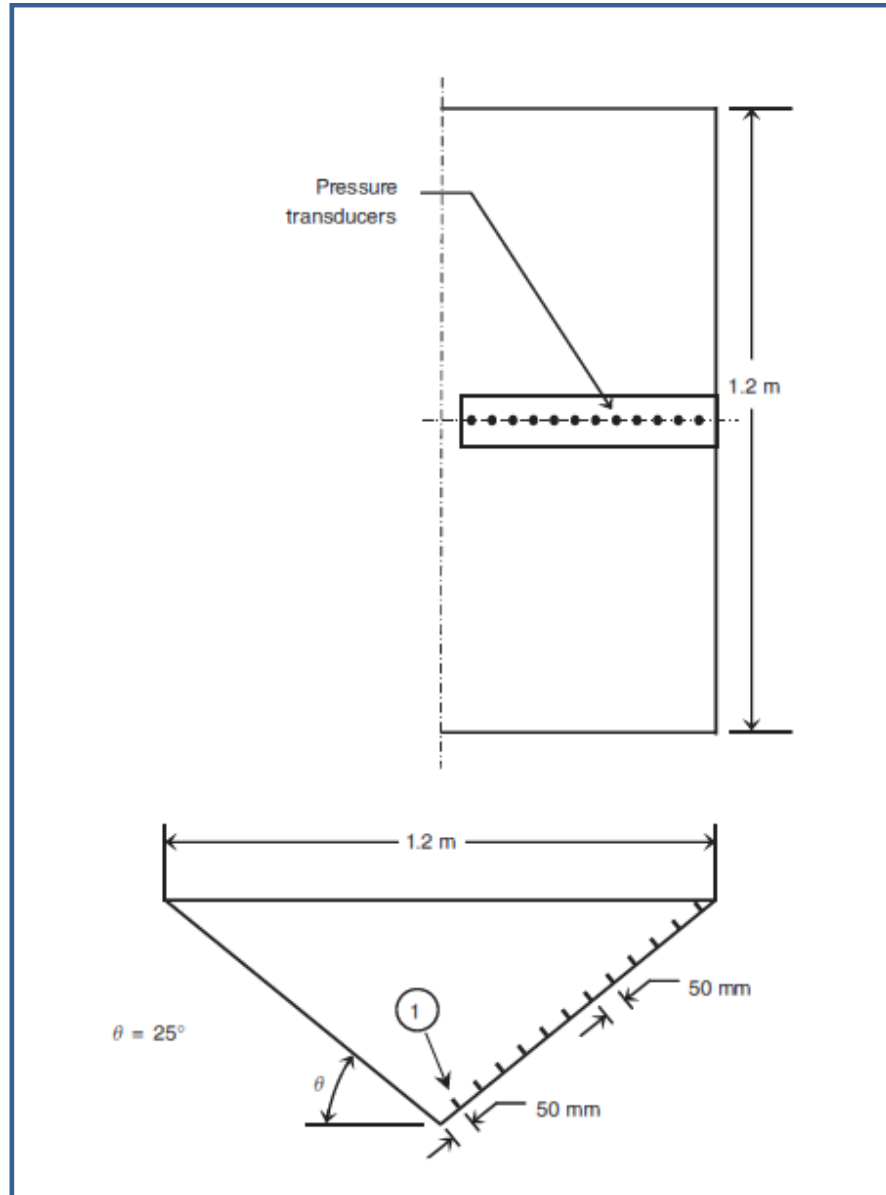


Figura 13. Morfología de la cuña. [8]

La cuña tenía una masa de 94 Kg y fue lanzada desde una altura de 1,3 m. Para poder medir la presión de contacto al impactar contra el agua se colocaron en su cara lateral 12 sensores de presión del modelo AB/HP (fig.14) [14], separados 50 mm

partiendo desde la arista de ataque de la cuña, como se puede apreciar en la imagen anterior. La superficie del sensor es de 4 cm².



Figura 14. Sensor de presión AB/HP. [14]

Del mismo modo para medir la posición, y con ella poder obtener la velocidad de la cuña, se empleó un potenciómetro Celesco modelo PT5A-100-S47-FR-1K-M6, cuyas características se muestran a continuación (fig.15 y fig.16) [15]:

Model Number:	
PT5A - 100 - S47 - FR - 1K - M6	
R	A
B	C
D	
R range:	100 inches
A measuring cable:	.047 stainless steel
B cable exit:	front
C output signal:	1000 ohm potentiometer
D electrical connection:	6-pin plastic connector

Figura 15. Ficha técnica del potenciómetro. [15]

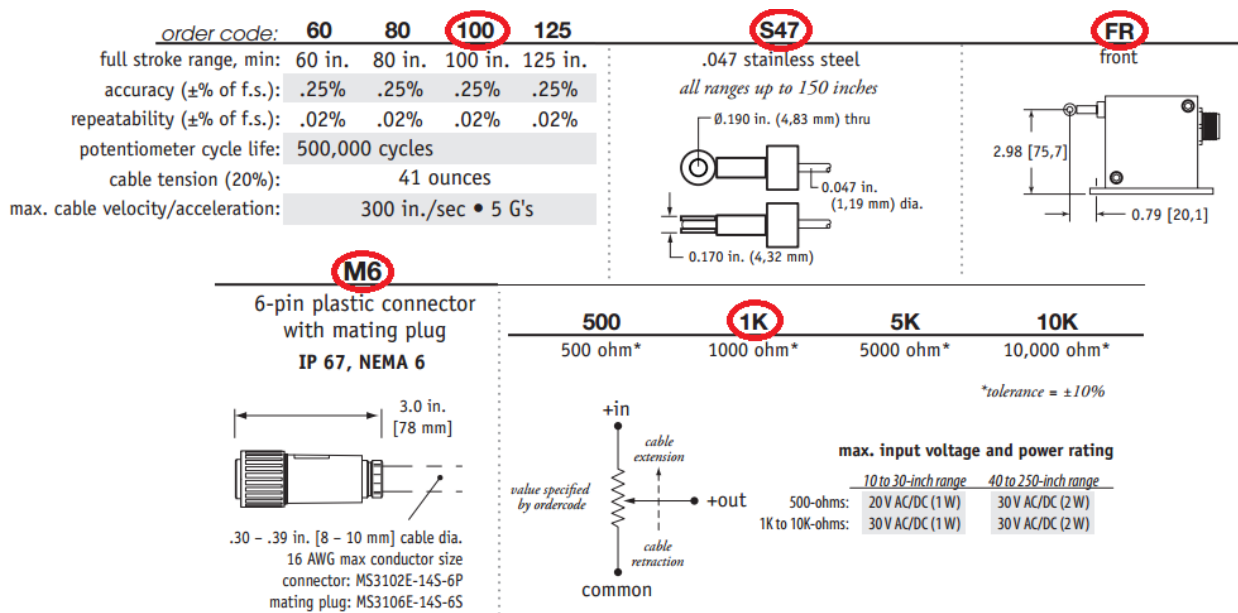


Figura 16. Características del potenciómetro. [15]

Gracias a la instrumentación implantada en la cuña se pudo recoger la información deseada del experimento. De este modo la velocidad de la cuña se puede apreciar en la siguiente imagen (fig.17):

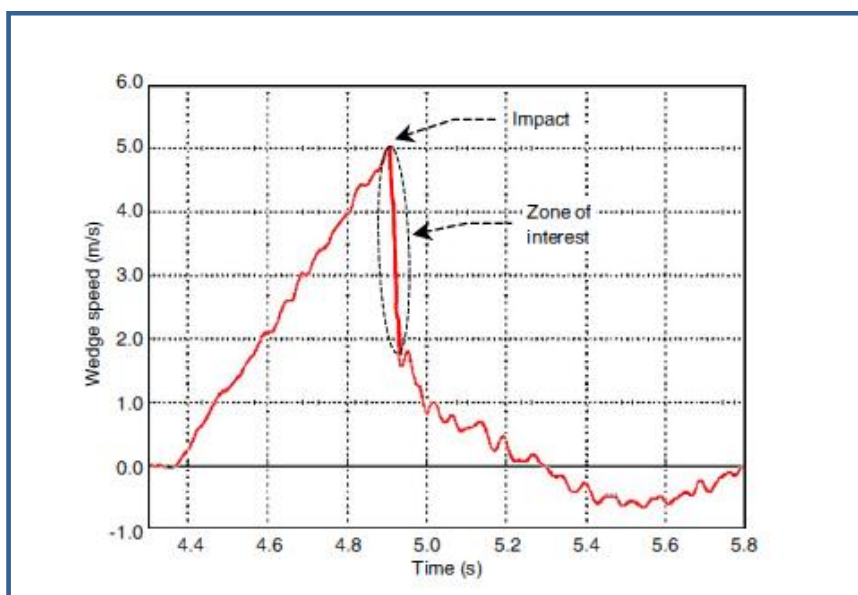


Figura 17. Evolución de la velocidad de la cuña. [8]

Se puede ver como la cuña parte desde el reposo, pues se trata de una caída libre, y se acelera hasta los 5 m/s antes de impactar contra el agua, cuando se reduce bruscamente la velocidad. Desde el punto de vista del proyecto la zona de interés se va a limitar a los 80 ms posteriores al impacto. La evolución de la velocidad en los primeros 40 ms es la que se muestra a continuación (*fig.18*):

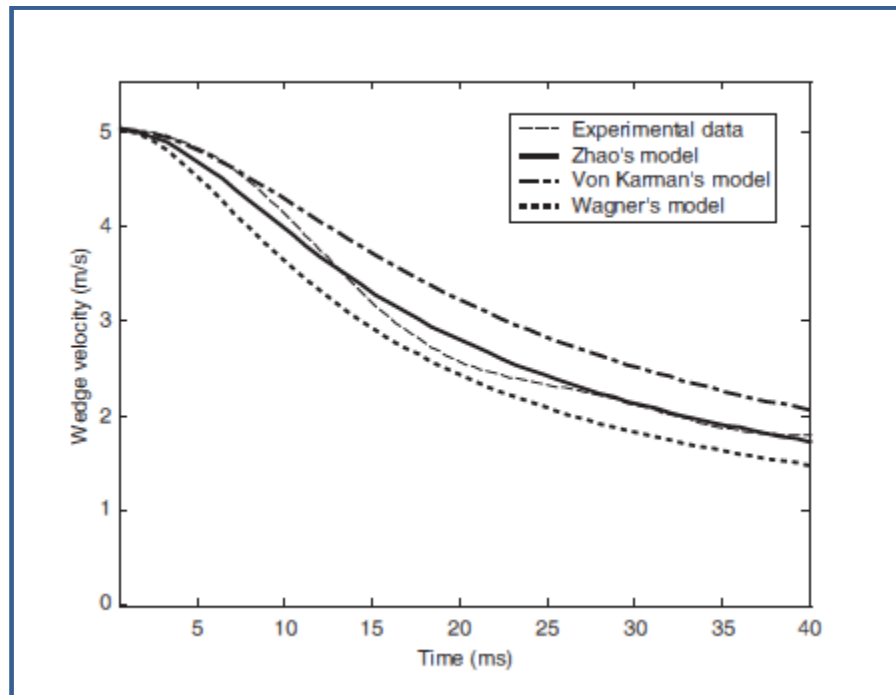


Figura 18. Detalle velocidad tras impacto. [8]

La figura recoge tanto la velocidad experimental como la teórica según diferentes modelos analíticos. De todos ellos el primero que surgió fue el de Von Karman (1929), al cual Wagner (1936) añadió los efectos de la salpicadura del fluido. Ya en 1996 Zhao mejoró todo lo anterior al incluir un término empírico para tener en cuenta el efecto tridimensional del problema. Durante el análisis de los diferentes métodos numéricos que se llevará a cabo en el siguiente capítulo se compararán los resultados obtenidos con los del ensayo experimental.

Como se ha comentado la zona de interés del problema se va a limitar a los 80 ms posteriores al impacto. Éste es el tiempo aproximado que tardan todos los sensores colocados en la cuña en entrar en contacto con el agua, y será por tanto el momento en el que se producen las mayores presiones. En la siguiente imagen (*fig.19*) se observa la evolución de la presión con el tiempo para cada uno de los sensores:

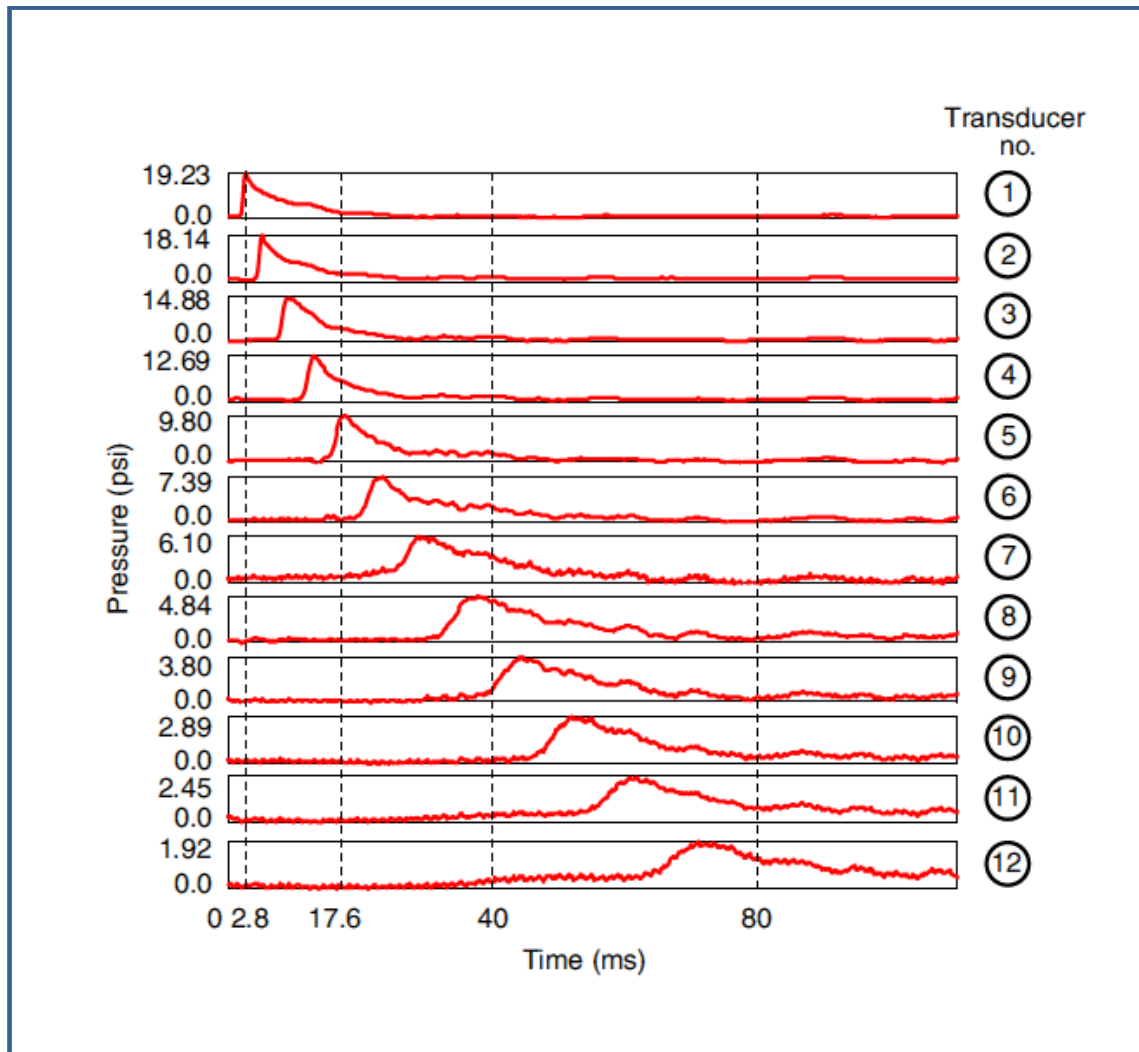


Figura 19. Evolución de las presiones. [8]

Se puede apreciar como las presiones son mayores en los primeros sensores, es decir, en los más próximos a la arista de ataque pues son los primeros en entrar en contacto con el agua, y por tanto donde el impacto es más fuerte.

CAPÍTULO 3

MODELIZACIÓN



3.1 DISEÑO DEL MODELO EN ABAQUS

Una vez explicado en qué consiste el ensayo experimental en el que se va a basar el proyecto se pasará a simular el mismo problema pero resuelto mediante métodos numéricos. Todo el trabajo realizado ha sido llevado a cabo con el programa Abaqus 6.11, última versión de uno de los software de cálculo numérico existentes en el mercado.

En primer lugar hay que decir que al consistir el experimento en una cuña de base cuadrada cayendo en el centro de un depósito de agua rectangular se podrá aprovechar el carácter simétrico del problema. De este modo, si se utilizan los dos planos de simetría existentes, y se aplican de forma correcta las condiciones de contorno, únicamente será necesario construir un cuarto del modelo.

Este hecho va a suponer una gran ventaja pues se está simplificando el problema, y el tiempo de cálculo se va a reducir a causa de que se utilizarán cuatro veces menos elementos.

A continuación se pasará a explicar el procedimiento seguido para el diseño del modelo. Como ya se sabe el problema a resolver está compuesto por dos partes fundamentales, de un lado la cuña y del otro el agua.

3.1.1 Diseño de la cuña.

La primera parte que se va a explicar es la cuña de madera, ya que ésta va a ser exactamente igual independientemente del método numérico utilizado. Al tratarse de un sólido deformable será diseñado como un cuerpo Lagrangiano pues las deformaciones que se pueden esperar sobre el sólido al impactar contra el agua van a ser muy pequeñas y en régimen elástico; y por tanto es el método más sencillo, adecuado y eficiente.

En la siguiente figura (*fig.20*) se puede ver la geometría de la cuña, en la que se han coloreado en verde y rojo los dos planos de simetría. Con ello la cuña tiene una base cuadrada con una dimensión de $0,6 \times 0,6 \text{ m}^2$.

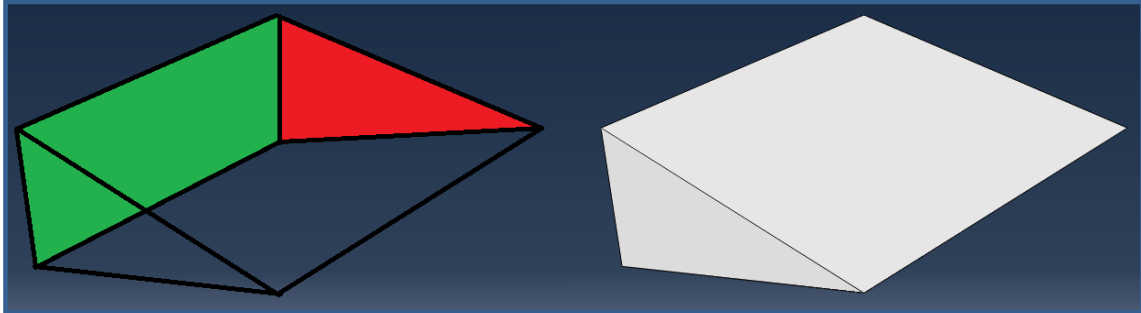


Figura 20. Geometría de la cuña.

El material en el que está construida la cuña es madera, pero debido al desconocimiento de la estructura del interior de ésta se tomó como premisa que se asemejaba a las propiedades elásticas del aluminio. Las propiedades físicas del sólido, suponiendo un comportamiento elástico y lineal, son las siguientes:

$$E = 70 \text{ GPa}$$

$$\nu = 0,3$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{94/4}{\left(\frac{0,6 \cdot (0,6 \cdot \tan 25^\circ)}{2}\right) \cdot 0,6} = 466,63 \text{ Kg/m}^3$$

Además de la creación de la geometría de la pieza es necesario imponerle unas condiciones de contorno. Al haber hecho uso de las simetrías del problema se ha impuesto la condición de simetría sobre los dos planos. También se modeló una restricción que impide todo grado de libertad excepto el desplazamiento vertical, ya que como se vio en el Capítulo 2 la cuña deslizaba por una guía que sólo permitía dicho movimiento [1]. Por último se ha definido su velocidad inicial, que es de 5 m/s en el momento exacto en el que la cuña entra en contacto con el agua. Además, al influir ya la gravedad en la velocidad inicial de impacto se ha tomado la hipótesis de que ésta no es significativa en el resto del análisis, debido también a la baja masa de la cuña.

3.1.2 Diseño del agua.

La parte más compleja de diseñar en el problema es el agua, que a diferencia de lo que sucedía con la cuña, donde la única posibilidad era un diseño Lagrangiano, ésta puede ser definida por diferentes métodos, y según el que se utilice tendrá unas determinadas características.

El depósito que contiene el fluido tiene unas dimensiones de 30 m de largo por 2 m de ancho y 1 m de profundidad, que al aplicar las dos simetrías quedan en 15 m de largo por 1 m de ancho y por 1 m de profundidad. Con el fin de reducir el cálculo computacional se ha buscado la forma de hacer la masa de agua lo más pequeña posible, sin modificar por ello el experimento. Así la geometría de agua que se ha dibujado en Abaqus tiene unas dimensiones de 1,2 m de largo por 1 m de ancho y 1 m de profundidad.

De los 15 m sólo se han representado 1,2 m (el doble del tamaño de la cuña) ya que frente a la longitud del depósito el tamaño de la cuña es despreciable. Además, al simular tan sólo los 80 ms posteriores al impacto la influencia de la masa de agua más alejada es poca. De todos modos se aplicarán las condiciones de contorno adecuadas con el fin de conseguir un problema totalmente equivalente.

Con ello la geometría del agua en Abaqus queda con una forma prismática, como se puede apreciar en la siguiente imagen (*fig.21*).

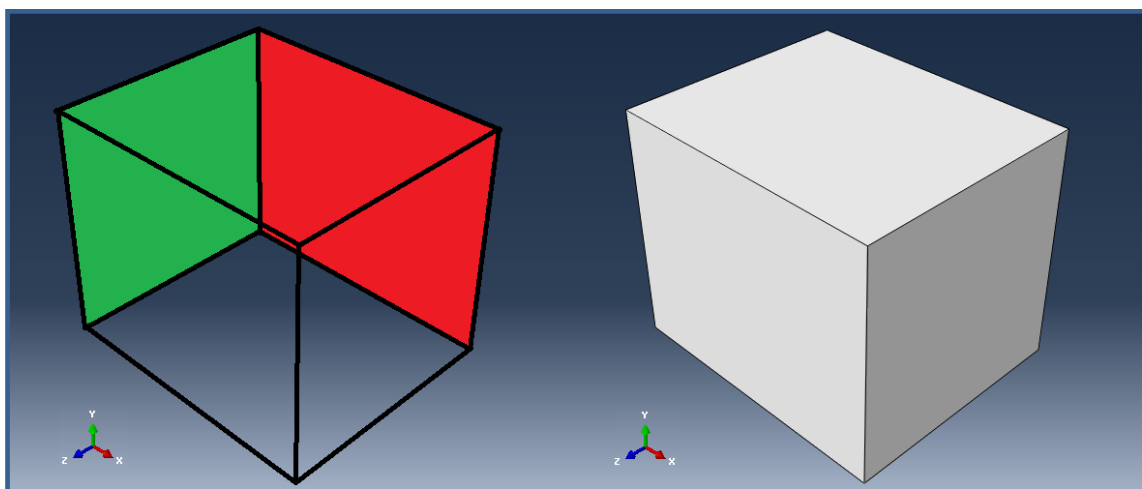


Figura 21. Geometría del agua.

Para definir las propiedades físicas del agua los parámetros introducidos fueron su densidad $\rho = 1000 \text{ Kg/m}^3$, su viscosidad dinámica $0,00089 \text{ Kg/m}\cdot\text{s}$ y una ecuación de estado tabular. Ésta consiste en la ecuación de Mie-Gruneisen para compresión, la cual relaciona los términos hidrostáticos con la densidad; y $P=0$ para tracción, puesto que un fluido sólo puede ser sometido a compresión [4]. La ecuación de Mie-Gruneisen es:

$$P = \frac{\rho_0 \eta c^2}{1 - s\eta} \left(1 - \frac{\Gamma_0 \eta}{2} \right) + \Gamma_0 \rho_0 E_m$$

Donde $\eta = 1 - \rho_0/\rho$, c es la velocidad del sonido en el material, Γ_0 , s y E_m son propiedades del material.

A continuación se detallarán brevemente las diferencias de diseño del agua en función del método numérico que apliquemos:

3.1.2.1 Método Lagrangiano

El primer método que se aplicará será el Lagrangiano. Al definir el agua como un cuerpo Lagrangiano se está asumiendo que su deformación será pequeña, y que por tanto la malla podrá soportar la distorsión que se produzca como consecuencia del impacto [3]. En caso contrario la malla se deformaría y los resultados que se obtengan podrían ser erróneos.

En cuanto a las condiciones de contorno el agua Lagrangiana tiene las mismas simetrías que la cuña, aplicadas en los mismos planos; y sobre las caras del agua en contacto con el depósito también se decidió simular como una condición de simetría, pues ésta limita el desplazamiento en el eje perpendicular al plano y los dos giros que no son entorno a dicho eje [2].

Para este método se empleó un elemento sólido hexaédrico con integración reducida (C3D8R).

3.1.2.2 Método Euleriano

Para diseñar el agua como un cuerpo Euleriano, la principal diferencia con el anterior consiste en que además de modelar la posición inicial del material, es necesario definir la zona por la que se espera que se desplace el fluido una vez reciba el impacto de la cuña [3]. Esta zona, que se denominará vacío, debe ser lo más ajustada posible ya que también tiene que ser mallada, y por tanto aumentará de forma considerable el tiempo de cálculo.

La malla la formarán las dos partes, tanto la zona ocupada inicialmente por el material como la zona de vacío, y el agua fluirá a través de ambas según el movimiento que describa.

En la siguiente figura (*fig.22*) se muestra el agua formada por el método Euleriano. En ella se puede apreciar las dos partes separadas por un plano horizontal. En la parte inferior la masa de agua original con las dimensiones ya vistas ($1,2 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$), y en la parte superior la capa de vacío, de 20 cm de altura.

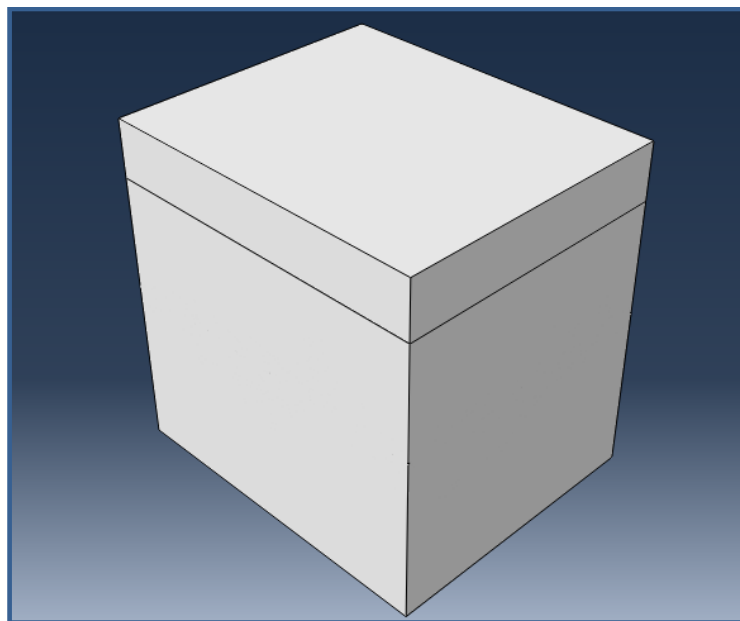


Figura 22. Modelado del agua por el método Euleriano.

En cuanto a las condiciones de contorno aplicadas sobre el agua euleriana son las mismas que en el caso Lagrangiano, excepto que en este método se ha aplicado la condición de infinito en la cara longitudinal para simular el hecho de que en la realidad

el agua continúa (el depósito tenía 15 m de longitud) a pesar de que sólo se haya representado 1,2 m [2].

En el caso Euleriano el elemento con el que se ha mallado el agua también es un sólido hexaédrico con integración reducida, pero de tipo Euleriano (EC3D8R).

3.1.2.3 Método ALE

Para definir el agua según el método ALE lo más importante fue estimar que movimiento de malla se iba a aplicar [1]. Como ya se explicó en el Capítulo 1, el ALE se puede decir que es una combinación entre los métodos Euleriano y Lagrangiano. Al igual que ocurría en el Euleriano es necesario crear una capa de vacío para que el agua pueda fluir cuando se produzca el impacto, sin embargo, dado que la malla se va a ir desplazando el tamaño inicial de esta capa puede ser mucho menor. Si se define correctamente la dirección de movimiento de malla se estará ahorrando tamaño de malla, o lo que es lo mismo, tiempo de computación. Debido al impacto de la cuña el agua se desplazará verticalmente, y por tanto será ésta la dirección de movimiento de malla.

En la *figura 23* se muestra el agua construida con el método ALE. Es una imagen ampliada para mostrar el detalle, en la parte superior, del plano que divide la zona inicial de agua con la de vacío, mucho más pequeña en este modelo que en el Euleriano. 1 cm frente a los 20 cm del método anterior.

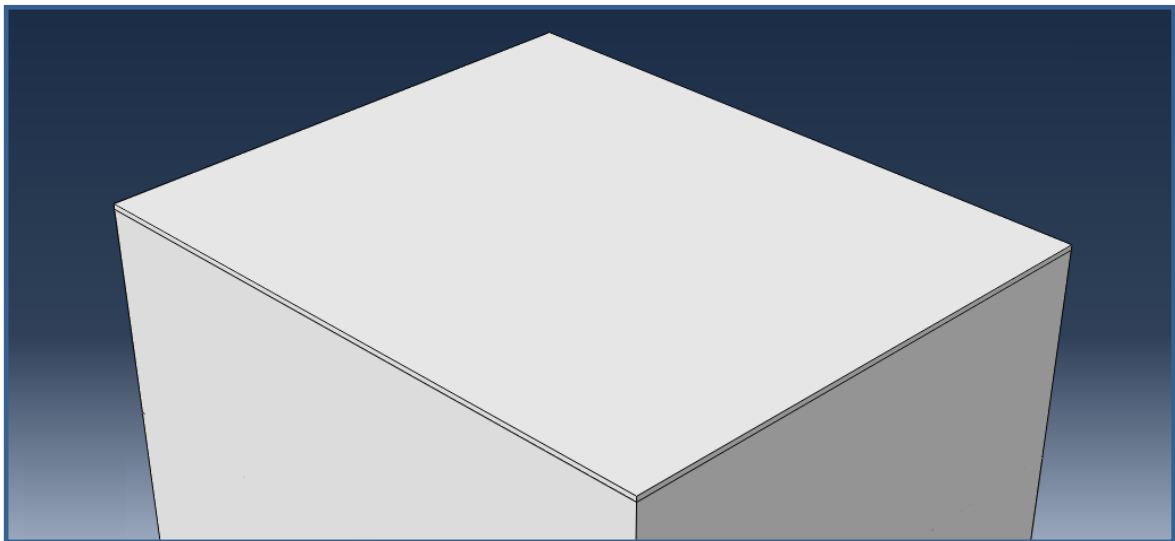


Figura 23. Modelado del agua por el método ALE.

En cuanto a las condiciones de contorno aplicadas decir que son las mismas que en el Euleriano a excepción de una nueva propia del ALE por la que se impone la dirección y velocidad de movimiento de la malla [2]. En el caso concreto del problema la dirección de desplazamiento de la malla es la vertical con sentido ascendente, y con un radio de expansión de 1,2. Esto supone que la dimensión final de la malla en su dirección del desplazamiento será 1,2 veces la dimensión inicial. Dicho parámetro fue elegido de forma que la dimensión final coincidiera con la del método Euleriano, para una mayor semejanza entre ambos casos.

Al igual que en el Euleriano el elemento empleado fue el EC3D8R.

3.1.2.4 Método SPH

Por último está el método SPH, que como ya se comentó en el primer capítulo consiste en un método sin malla en el que las estructuras, en este caso el agua, se construyen con partículas SPH. Estas partículas son pequeñas esferas con masa y con radio, de modo que para una misma masa de agua cuantas más haya menor será su tamaño y su masa, y más real será el comportamiento del fluido. Por otra parte, como cabe esperar, a mayor número de elementos mayor cálculo computacional.

Las condiciones de contorno aplicadas sobre el agua SPH son exactamente las mismas que las impuestas al Lagrangiano, es decir, las condiciones de simetría [2]. Por su parte el elemento empleado fue el PC3D, un elemento de un único nodo asociado a cada partícula que permite situarlas en el espacio. Para unos resultados más precisos las partículas deberán estar colocadas lo más uniformemente posible.

3.1.3 Diseño del conjunto.

Una vez se ha explicado el diseño de las dos partes del modelo es necesario crear la interacción entre ambas. Para ello se utilizará el *General Contact* ya que es una forma muy sencilla que nos ofrece Abaqus de crear el contacto, y que permite modelar el impacto entre secciones [1].

La posición inicial de la cuña respecto del agua no será la altura de caída libre a 1,3 m del agua, sino el momento justo de impacto. La primera situación supondría un consumo inútil de recursos ya que la caída no aportaría nada nuevo a la solución. La velocidad de la cuña al entrar en contacto con el líquido elemento es 5 m/s.

En la siguiente imagen (*fig.24*), recogida del método Lagrangiano, se puede apreciar como queda construido el modelo. Del mismo modo en la parte de la izquierda se pueden ver marcados en verde y rojo los dos planos de simetría del problema.

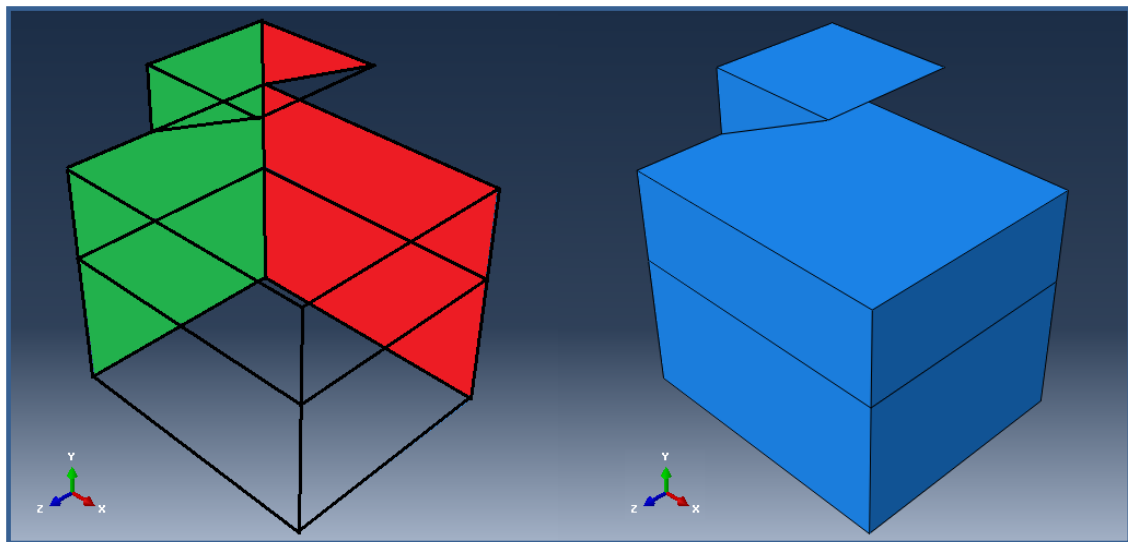


Figura 24. Montaje de la cuña con el agua.

3.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Tras explicar el proceso de construcción del modelo se pasarán a analizar los resultados obtenidos con cada uno de los cuatro métodos numéricos. Para ello se compararán los valores obtenidos con los que cabría esperar según el ensayo experimental.

Apuntar que el método Lagrangiano va a ser la excepción, pues como se verá a continuación no va a ser capaz de resolver el problema de forma correcta y por tanto será descartado de forma inmediata de ser el método numérico más apropiado para el problema.

En cuanto al Euleriano, ALE y SPH se ha realizado una sensibilidad a la malla. Los diferentes casos se denominaron *grueso*, *medio* y *fino* según va aumentando el número de elementos. El objetivo es apreciar la evolución de los resultados, no sólo variando el método numérico, sino también el número de elementos.

Como ya se ha comentado las variables con las que compararemos los distintos métodos serán la velocidad de la cuña y las presiones que se producen en ésta a consecuencia del impacto contra el agua. No sólo se mirará el pico de presión obtenido en cada sensor sino además, el instante de tiempo en el que se produce.

En primer lugar se compararán entre sí las diferentes mallas de cada uno de los métodos numéricos. Para ello se recurrirá al error relativo de las distintas variables, que se define como:

$$error\ relativo\ [\%] = \frac{|x_{experimental} - x_{numérico}|}{x_{experimental}} \cdot 100$$

Donde x será cualquiera de las variables mencionadas, $x_{experimental}$ el valor de esa variable en el ensayo experimental y $x_{numérico}$ el valor obtenido mediante Abaqus. El resultado irá expresado en %.

El error relativo permitirá valorar de forma objetiva cuanto se aproximan los resultados obtenidos a los experimentales. Se estudiará el valor de este error para la velocidad de la cuña en diferentes instantes de tiempo durante el impacto, cada 5 ms hasta los 40 ms, pudiendo comparar así las diferentes mallas y métodos numéricos.

El mismo procedimiento se seguirá con las presiones, donde se mostrarán los errores cometidos en cada ensayo tanto en el pico de presión como en el tiempo de pico. Otra forma de comparar las presiones de los distintos ensayos será representando para cada uno de ellos esas mismas variables, es decir, el pico de presión frente al tiempo de pico en cada uno de los sensores (ver *figura 28*). Con todo ello se estará en condiciones de discernir que malla es más eficiente en cada método numérico.

Decir además que las presiones de los sensores que proporcionaba Abaqus están distorsionadas por el ruido numérico de altas frecuencias, por lo que fue necesario filtrarlas previamente. Para ello se utilizó el filtro paso bajo de Butterworth.

Una vez se haya seleccionado la mejor malla de cada método se compararán éstas entre sí. En este caso habrá que tener en cuenta no sólo la calidad de los resultados sino también el tiempo de computación invertido en obtenerlos. Valorando todo esto se verá que método numérico de los cuatro iniciales es el más adecuado para este tipo de problemas con interacción fluido-estructura.

3.2.1 Método Lagrangiano.

El primer método en utilizarse fue el Lagrangiano por ser el más habitual, aunque no en sistemas con elevadas deformaciones como es nuestro caso. Como ya se explicó la característica más importante de este método es que la malla está permanentemente unida al material, de modo que las deformaciones que sufre el material las sufrirá también la malla; y si éstas son elevadas la malla sufrirá una gran distorsión y los resultados serán incorrectos. Por este motivo cabe esperar que los resultados que se obtengan del análisis Lagrangiano no sean buenos [3] y [4].

Tras lanzar el caso Lagrangiano se observa que Abaqus es incapaz de llegar a completar el análisis, precisamente porque al impactar la cuña contra el agua ésta última se deforma tanto que su malla se distorsiona excesivamente y finalmente el análisis es abortado.

En la siguiente imagen (*fig.25*) se muestra el sistema justo en el punto en el que fue abortado. En ella se puede apreciar como el modelo aparece distorsionado y por ello no pudo ser resuelto adecuadamente.

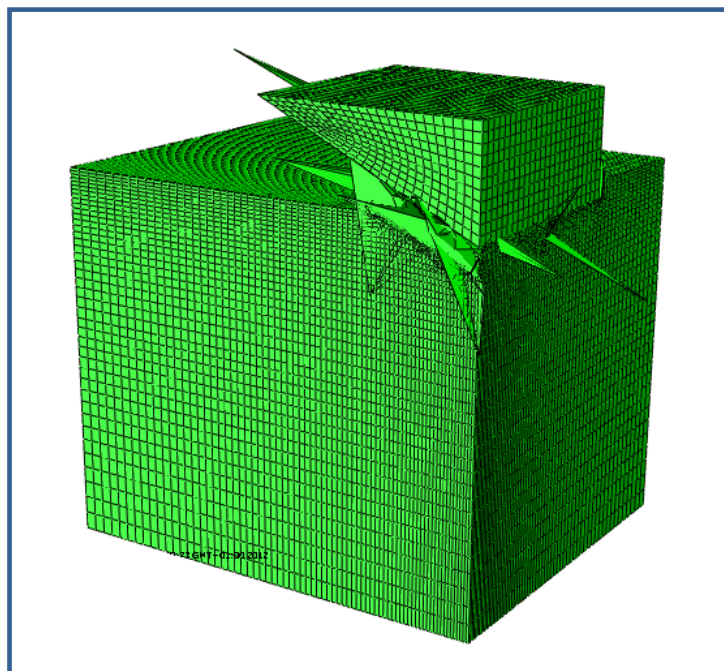


Figura 25. Distorsión del modelo Lagrangiano.

El análisis se detuvo en el milisegundo 9,3 de los 80 que debería haber durado. Por tanto se ve que el Lagrangiano no se puede utilizar en problemas expuestos a elevadas deformaciones aunque el tiempo de análisis sea reducido porque la distorsión es importante.

Otra forma que tenemos para ver que el método Lagrangiano no es válido y que el análisis finalizó sin llegar a resolverse es mediante las variables de salida que nos proporciona el programa, y concretamente, con la velocidad de la cuña.

En la siguiente gráfica (*fig.26*) se comparan la velocidad obtenida con Abaqus y la del ensayo experimental:

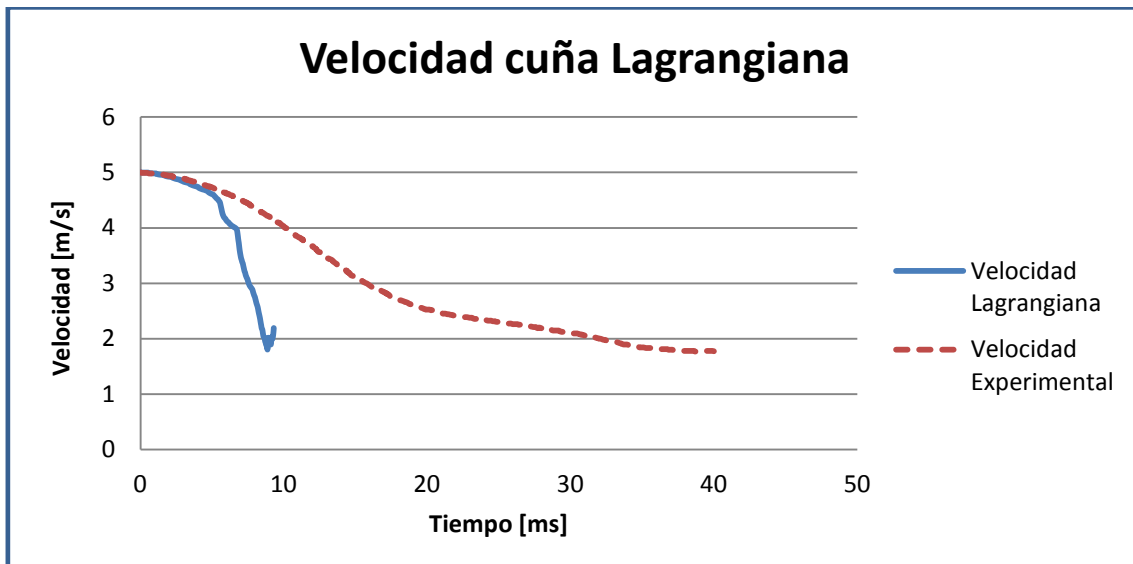


Figura 26. Velocidad de la cuña según modelo Lagrangiano.

Nuevamente, en este caso a través de la velocidad de la cuña, se ve que los resultados que arroja este primer método numérico no son válidos. En la gráfica se puede observar como inicialmente la velocidad Lagrangiana coincide perfectamente con la otra, lo que hace pensar que el modelo está correctamente construido, sin embargo, en torno a los 6 ms la deceleración de la cuña se vuelve mucho más brusca hasta que finalmente el análisis se detiene. Este hecho anómalo es consecuencia de la fuerte distorsión que sufre el mallado.

Se puede concluir por tanto lo que en un principio se podía imaginar, que el Lagrangiano no es el método apropiado para un análisis con grandes deformaciones.

A continuación se resolverá el mismo problema pero aplicando otros métodos numéricos (Euleriano, ALE y SPH) que a priori deberían ser más adecuados para este tipo de análisis.

3.2.2 Método Euleriano.

El método Euleriano puede suponer una importante mejora respecto del anterior para el tipo de problema que se pretende resolver, en el cual las deformaciones que se van a dar van a ser importantes. La gran ventaja frente al método Lagrangiano radica en el hecho de que en el Euleriano la malla no está unida al material, sino que éste fluye a través de ella. De modo que aunque el material se deforme la malla no se verá distorsionada [3] y [4].

El Euleriano, del que cabe esperar mejores resultados, se ha aplicado al modelo con tres tamaños de malla diferentes (gruesa, media y fina) de forma que se pueda apreciar una cierta evolución en el método. (Tabla 1).

Modelo	Nº Elementos
Eul. Grueso	8898
Eul. Medio	41069
Eul. Fino	313401

Tabla 1. Elementos del método Euleriano.

En la figura 27 se compara la evolución en la velocidad de la cuña de los tres mallados con la experimental mediante el ya explicado error relativo.

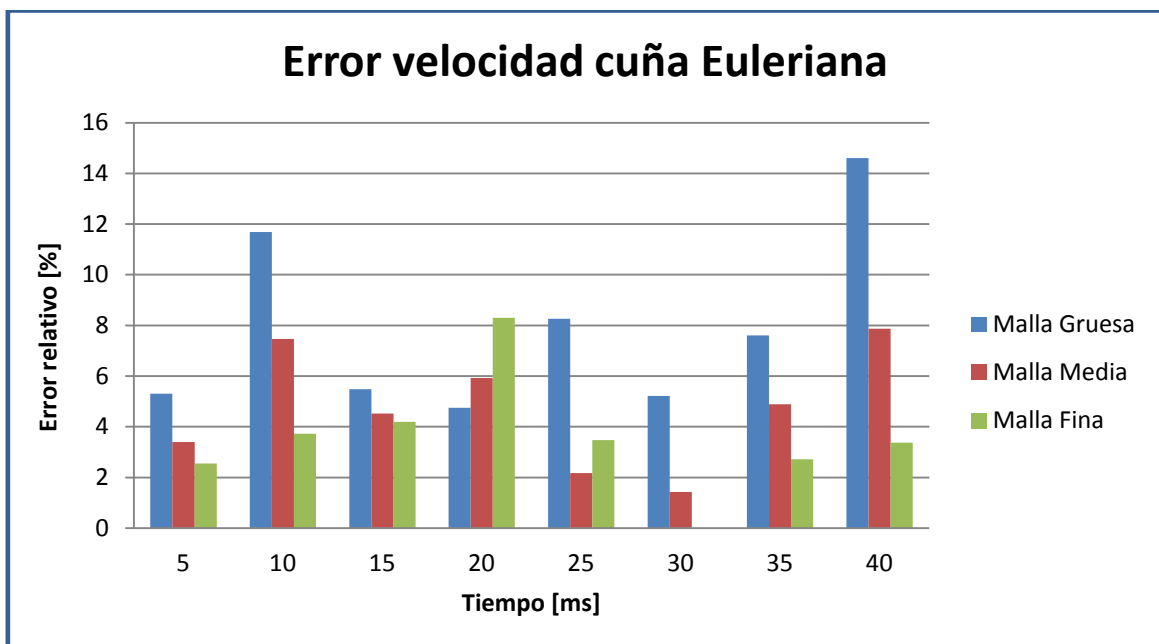


Figura 27. Error relativo en la velocidad de la cuña con el método Euleriano.

Para poder comparar la velocidad de Abaqus con la experimental se calculó el error relativo en ocho tiempos diferentes, cada cinco milisegundos.

Observando la gráfica anterior lo primero que se ve es que el porcentaje de error con respecto a los resultados experimentales para los tres mallados es considerablemente bajo. En los casos más desfavorables apenas se supera un error del 10 %, y observando los casos medio y fino, ni siquiera se alcanza dicho valor.

Se puede ver como el mallado grueso arroja los peores resultados a lo largo de todos los tiempos, lo que se debe al hecho de que el tamaño de sus elementos de malla es grande y por tanto no se ajusta con suficiente precisión al modelo. Sin embargo si se comparan la malla media y la fina existe una cierta alternancia, según el tiempo, en cuál es la más precisa.

Por todo lo dicho, como conclusión de la velocidad de la cuña, en principio la malla gruesa podría descartarse frente a las otras dos. Respecto a las mallas media y fina existe mayor discrepancia, y el error no es suficiente como para poder decantarse por ninguna de las dos. A continuación se compararán las presiones y se intentará valorar que mallado Euleriano es el más preciso.

En la *figura 28* se muestra la evolución de la presión máxima que soporta la cuña con el tiempo. Para ello se representan los picos de presión (presión y tiempo) de los nueve primeros sensores de la cuña.

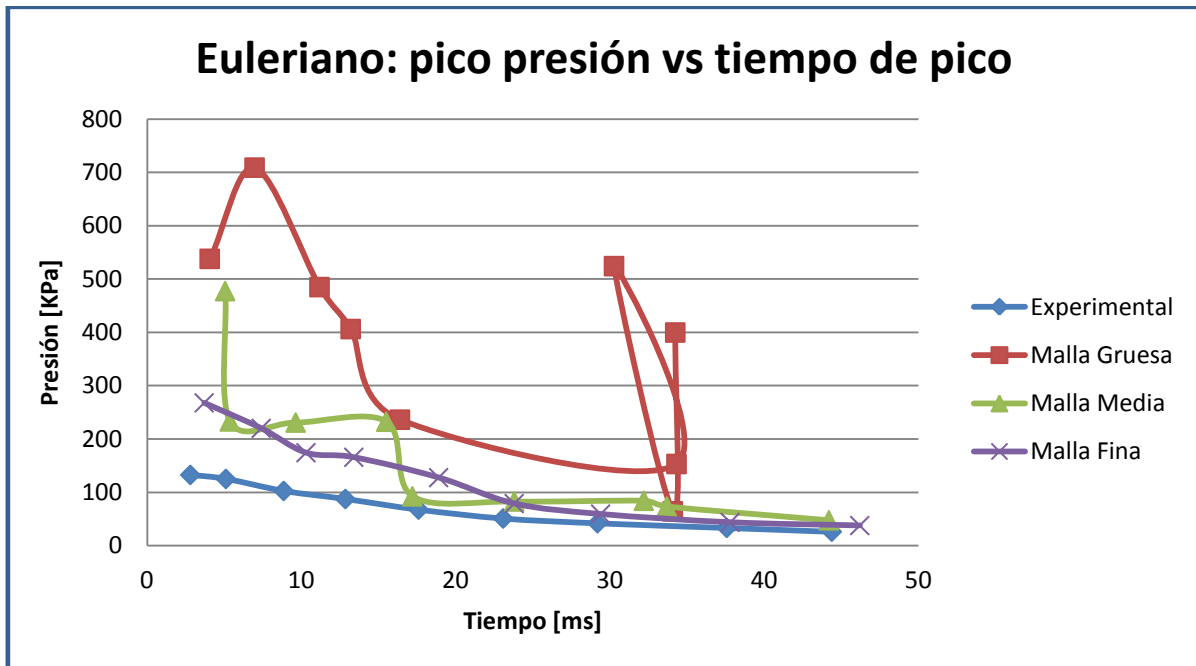


Figura 28. Presiones máximas en la cuña del método Euleriano.

Al igual que sucedía en la velocidad, la malla gruesa también arroja los peores resultados de presión, muy alejados de los valores esperados, e incluso incoherentes; pues se puede ver cómo según esta malla el sensor 7 sufre su máxima presión antes que el sensor 6.

En la gráfica anterior ya se observaba que la malla fina se aproxima considerablemente a la solución real del problema, sin embargo, si se aplica el error relativo tanto a la variable independiente (tiempo de pico) como a la dependiente (pico de presión) se podrá valorar objetivamente este hecho.

La figura 29 representa el error relativo cometido en los picos de presión de los sensores para los tres mallados:

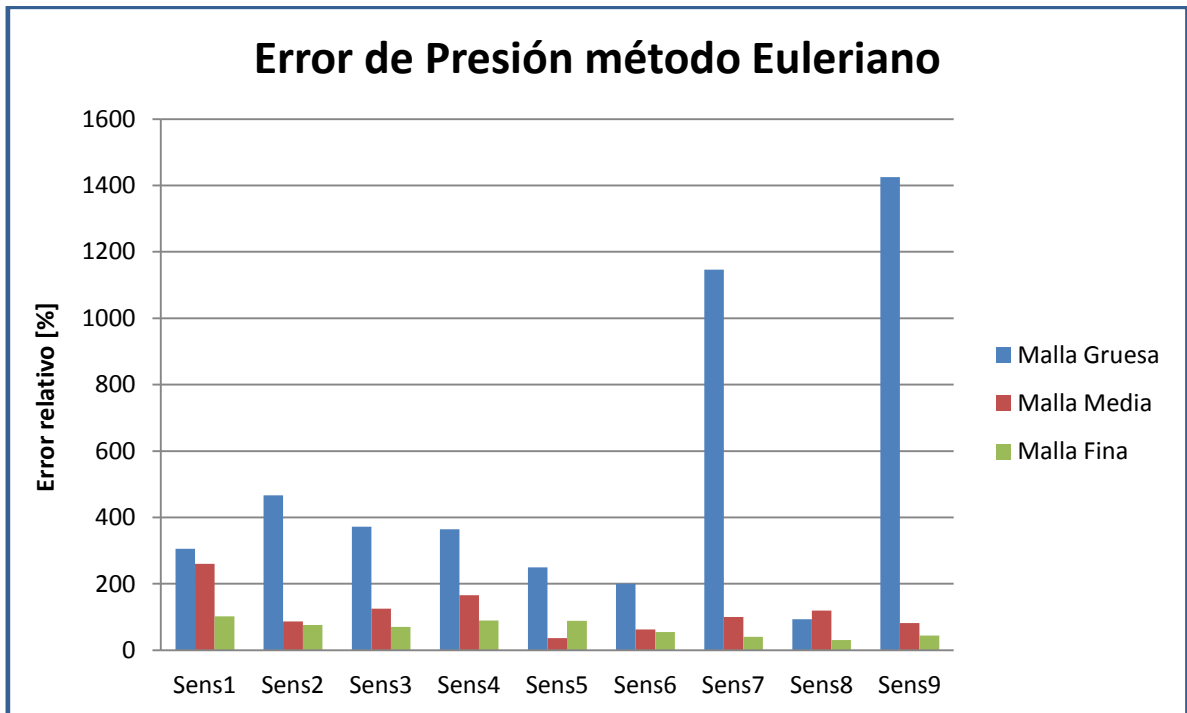


Figura 29. Error relativo en los picos de presión con el método Euleriano.

Directamente se observa que la malla gruesa es inapropiada. La malla media no ofrece malos resultados, pero la fina es más exacta.

Representando ahora el error relativo en los tiempos de pico para los sensores de la cuña se obtiene la siguiente gráfica (*fig.30*):

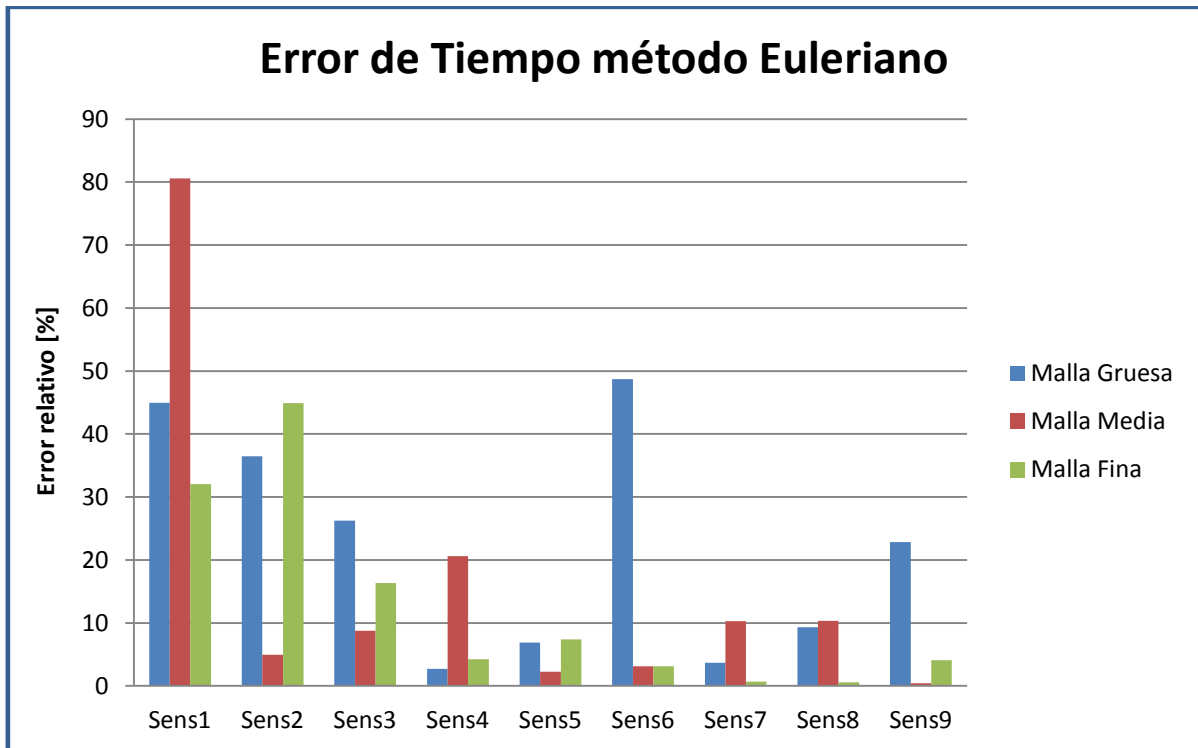


Figura 30. Error relativo en los tiempos de pico con el método Euleriano.

Valorando esta última gráfica se observa que los casos que ofrecen unos resultados más homogéneos son el grueso y el medio.

Haciendo recopilación del conjunto de gráficas obtenidas queda la duda de si el mejor mallado es el medio o el fino, ya que el grueso queda totalmente descartado. Ambos son similares en la velocidad de la cuña, y el medio define casi tan bien como el mallado fino los tiempos de pico. En cambio en los picos de presión se ve como la malla fina se ajusta mejor a la física del problema. Por ello, y aunque el tiempo de computación sea mayor como se verá más adelante, la mejora de los resultados entre ambas es significativa y por tanto se escoge la malla fina como la mejor de las tres.

Una vez elegida la mejor malla se mostrará para ésta la situación final del impacto (*fig.31*) una vez transcurridos los 80 ms de la simulación, y una comparación con los resultados experimentales de la velocidad y la presión.

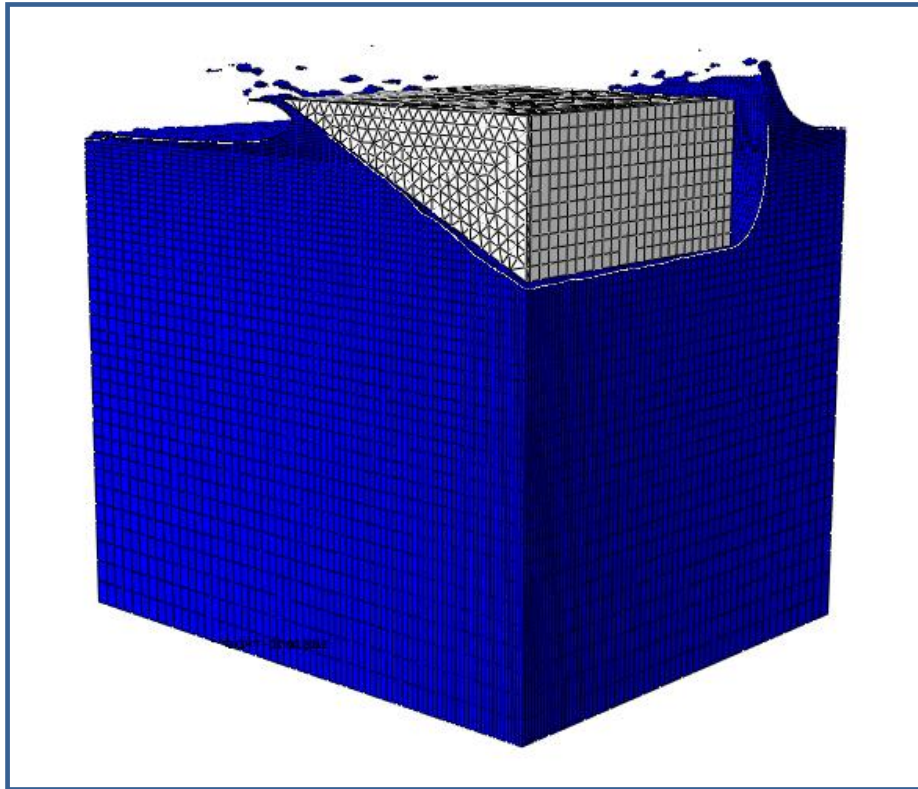


Figura 31. Modelo Euleriano con malla fina.

En la siguiente figura (*fig.32*) están representadas la velocidad experimental y la obtenida con Abaqus para el mallado más fino. Se puede comprobar lo que ya se representó con el error relativo en la *figura 27*, es decir, que la similitud entre ambas curvas es muy grande.

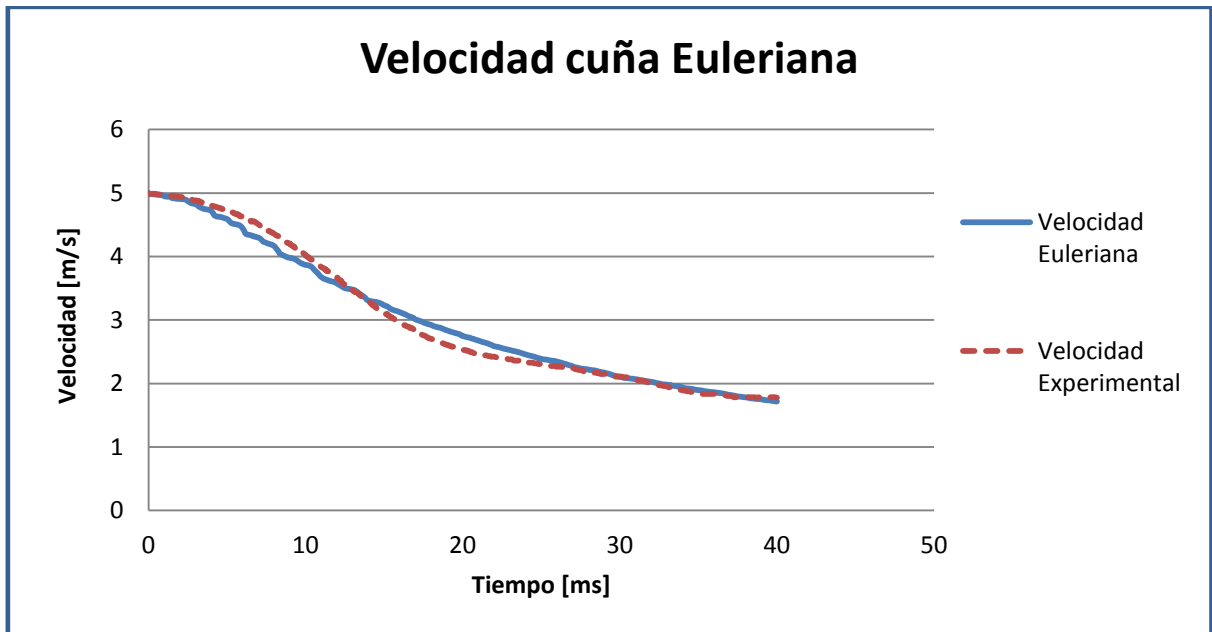


Figura 32. Velocidad de la cuña para el modelo Euleriano y el experimental.

Por último se van a representar las presiones recogidas por los sensores para poder comparar de forma visual el ensayo experimental y el modelo de Abaqus. En primer lugar se muestran las experimentales (*fig.33*) y a continuación las del método Euleriano (*fig.34*).

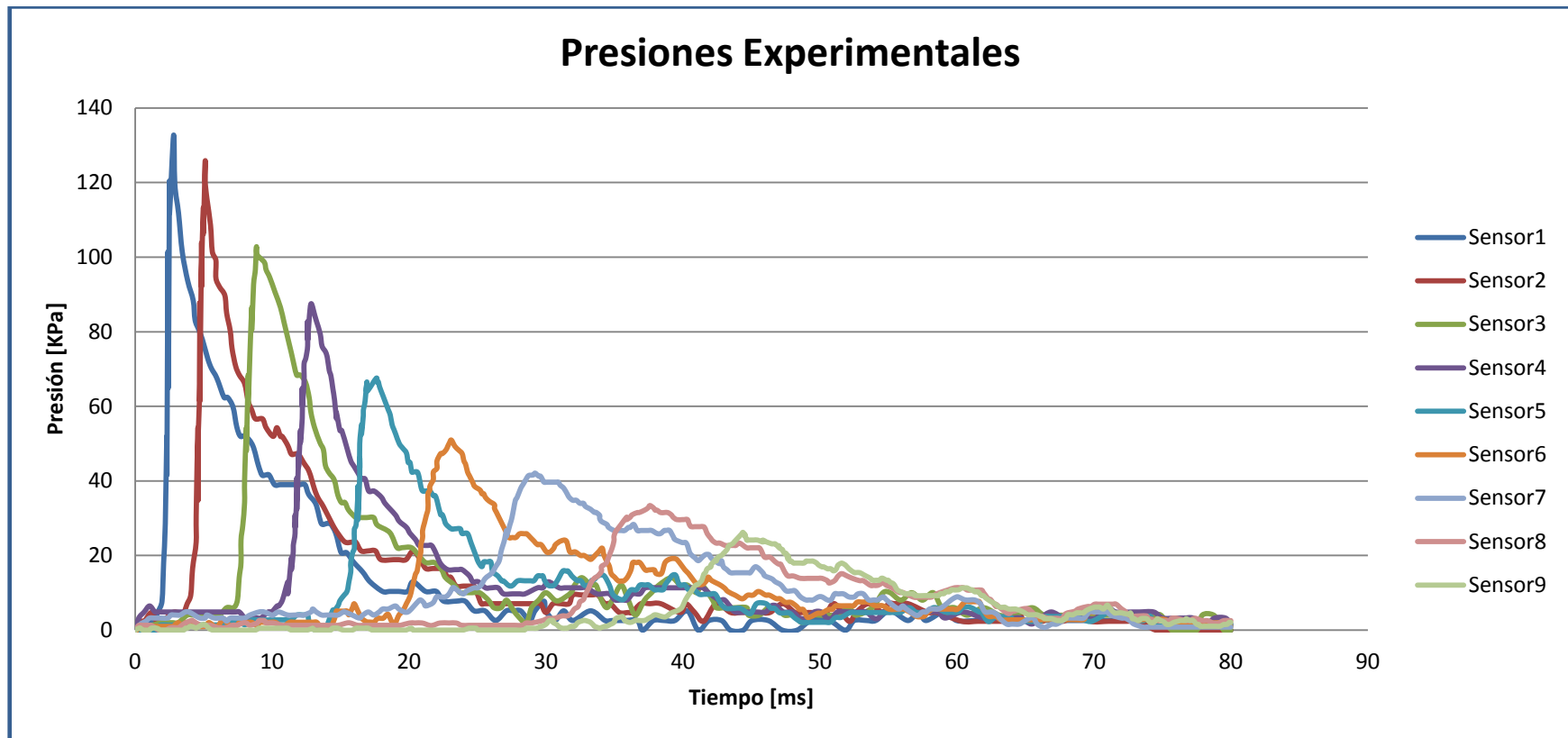


Figura 33. Presiones experimentales.

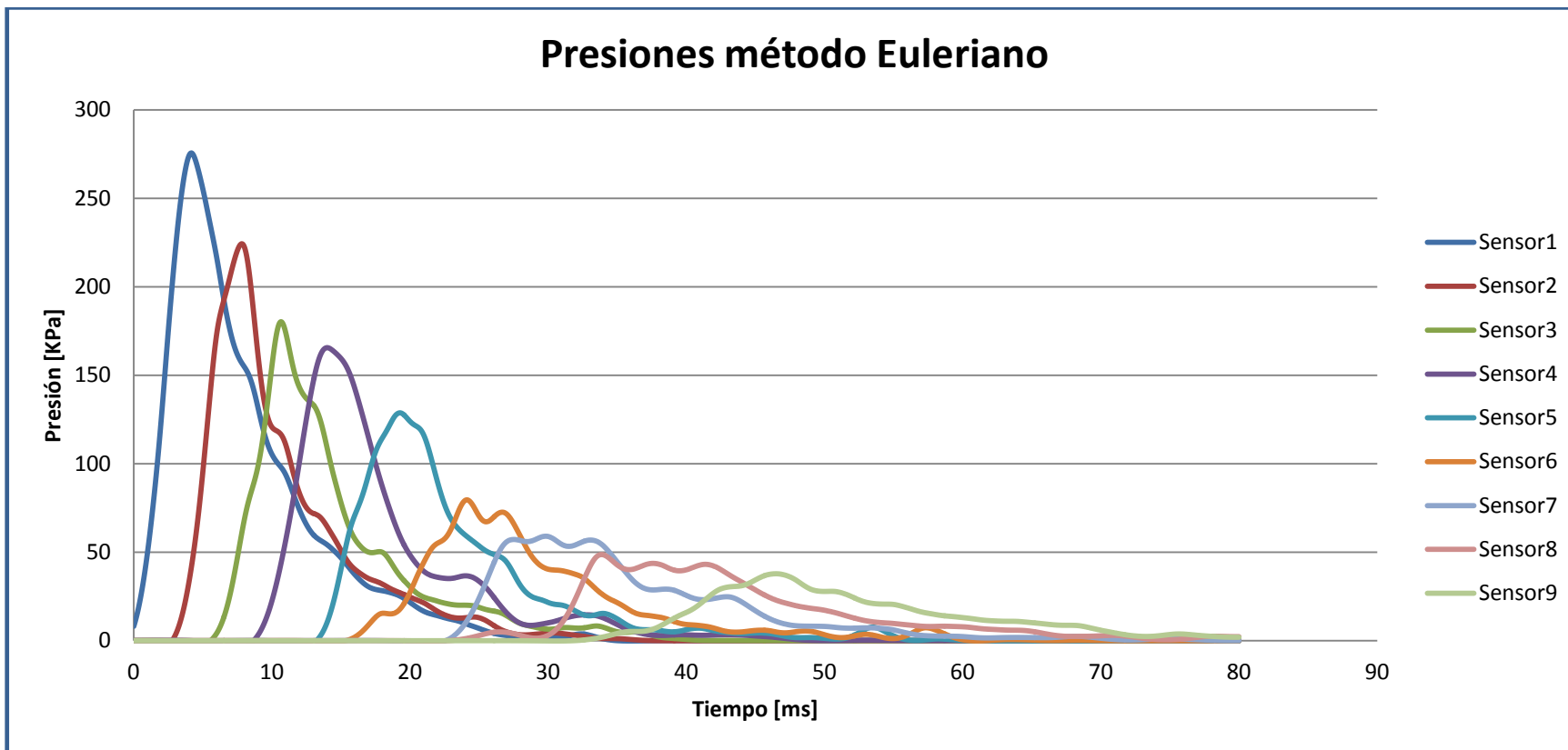


Figura 34. Presiones del método Euleriano.

3.2.3 Método ALE.

El tercer método numérico es el ALE, que es un método similar al Euleriano pero combinando características Lagrangianas. De este modo la malla se deformará ligeramente y se adaptará al problema recalculándose en cada paso para adaptarse al desplazamiento del material [3] y [4].

Las tres mallas empleadas para este método se resumen en la *Tabla 2*:

Modelo	Nº Elementos
ALE Grueso	7324
ALE Medio	32429
ALE Fino	248601

Tabla 2. Elementos del método ALE.

Para analizar los resultados obtenidos se seguirá el mismo patrón que con el Euleriano. En primer lugar se compararán las velocidades de la cuña mediante su error relativo (*fig.35*):

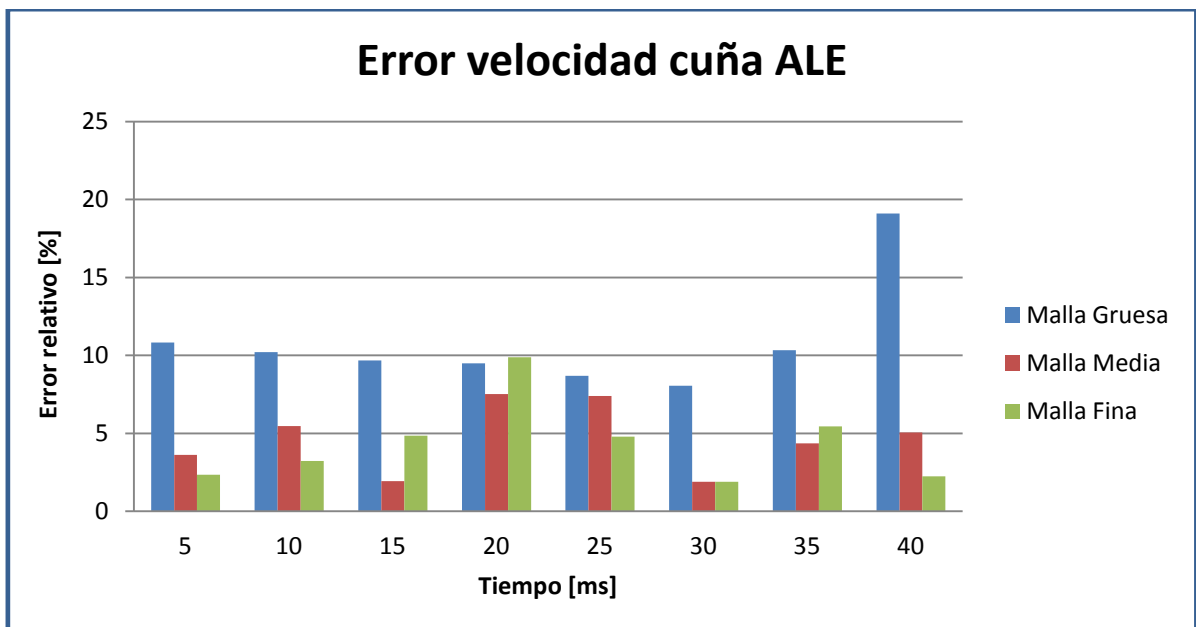


Figura 35. Error relativo en la velocidad de la cuña con el método ALE.

Los resultados que se muestran en la gráfica son muy buenos, pues al igual que ocurría con el Euleriano los errores apenas superan el 10%. A la vista de éstos sería difícil descartar alguno de los tres mallados, pues aunque el grueso es ligeramente peor, en función de los resultados obtenidos con las presiones podría considerarse aceptable.

Una vez visto que para la velocidad de la cuña los tres mallados del método funcionan correctamente se pasará a analizar las presiones. En primer lugar, en la *figura 36* se muestra la evolución de las presiones máximas que soporta la cuña en el impacto contra el agua.

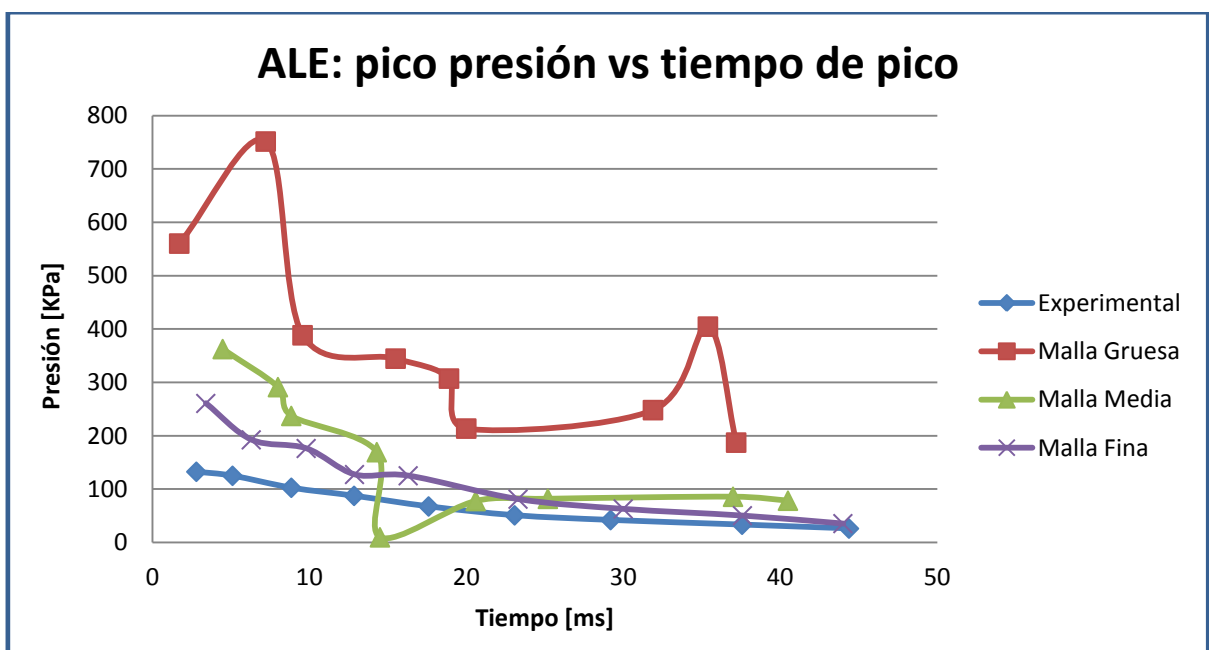


Figura 36. Presiones máximas en la cuña del método ALE.

Si con la gráfica de las velocidades resultaba complicado descartar ningún mallado, viendo las presiones se observa como la malla gruesa se aleja mucho de los resultados experimentales esperados. Por ello podría quedar inmediatamente descartada.

Por otra parte la diferencia entre las mallas media y fina, aún siendo ésta última mejor, no es tan evidente y se esperará a ver las gráficas siguientes para valorar objetivamente los resultados.

En primer lugar se representa el error relativo cometido en los picos de presión para cada mallado (*fig.37*).

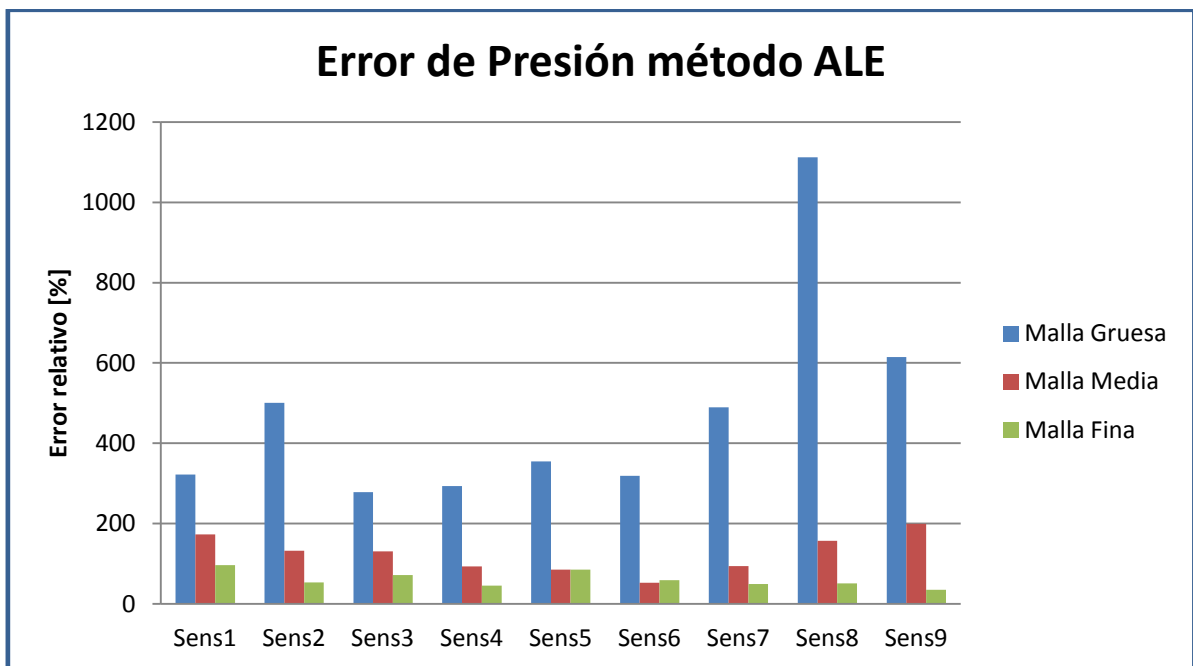


Figura 37. Error relativo en los picos de presión con el método ALE.

En la gráfica se puede ver en primer lugar que la malla gruesa no es válida debido a que la diferencia con el experimental es significativa. Entre la malla media y la fina las diferencias son mucho menores pero aún así la malla fina presenta mejores resultados.

A continuación se muestra que sucede con el error relativo del tiempo de pico (fig.38):

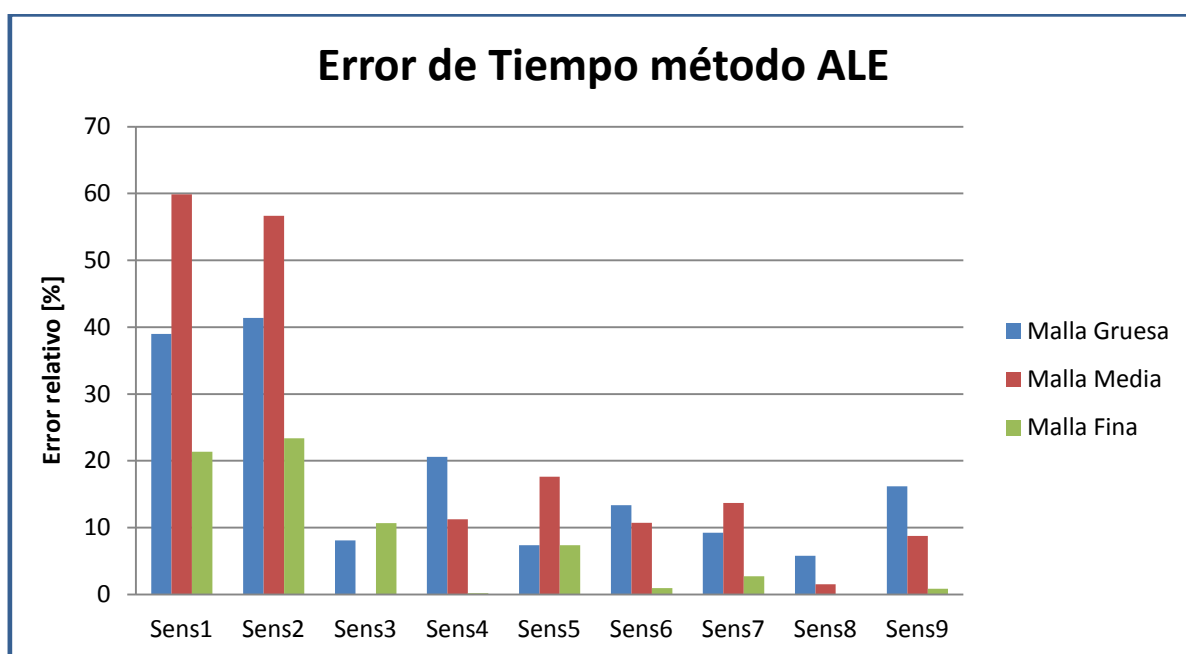


Figura 38. Error relativo en los tiempos de pico con el método ALE.

Al igual que sucedía con la presiones el mejor mallado, y además el más estable a lo largo de todos los sensores es el fino. La malla con un tamaño medio presenta en los dos primeros sensores un error considerable, que unido al hecho de que las presiones también eran ligeramente peores que en la malla fina hace que nos decantemos por ésta última como el mejor ensayo de los tres realizados con el método ALE.

Una vez se ha elegido la malla fina como la mejor de las tres se pasará a mostrar los resultados reales que ofrece Abaqus para dicha malla.

En primer lugar, en la *figura 39* aparece el modelo real tras los 80 ms de simulación. A continuación (*fig.40*) se muestra la velocidad de la cuña en comparación con los resultados experimentales, donde se puede ver la gran similitud entre ambas curvas.

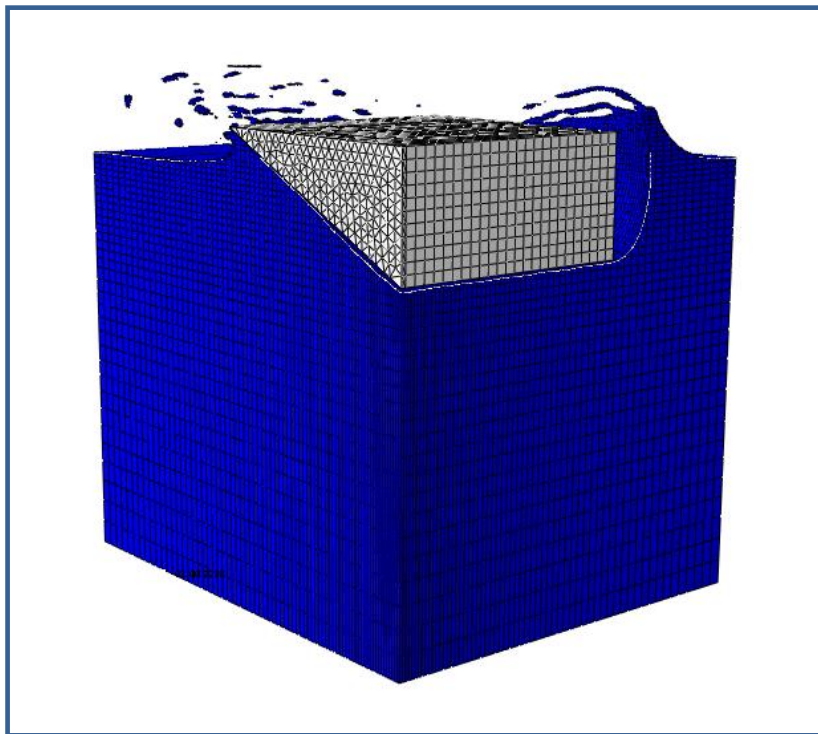


Figura 39. Modelo ALE con malla fina.

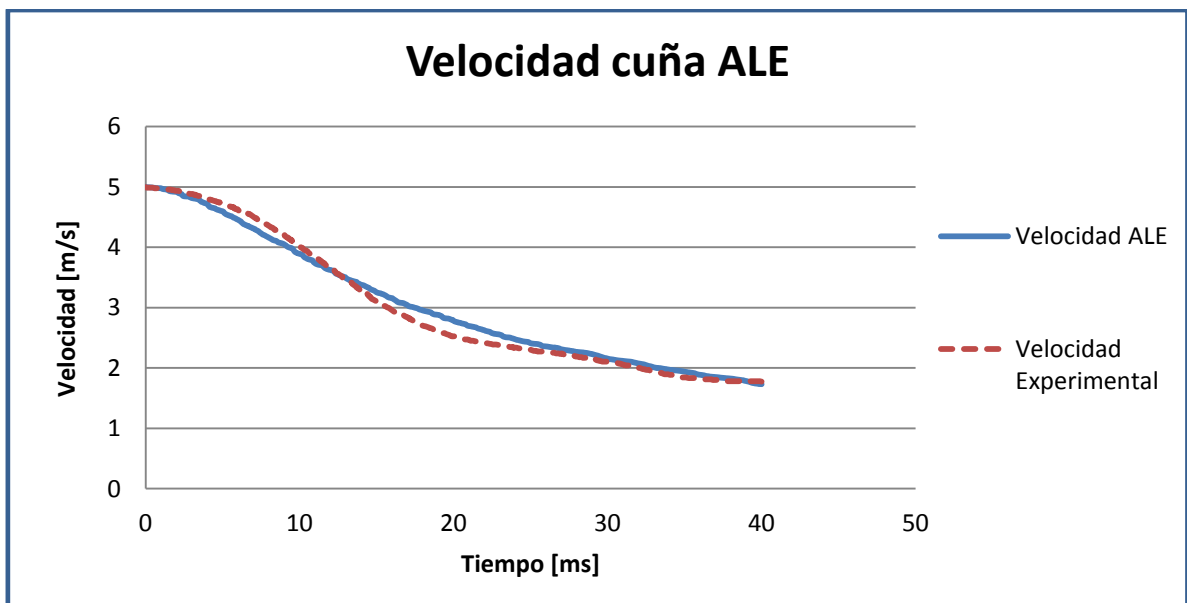


Figura 40. Velocidad de la cuña para el modelo ALE y el experimental.

Para terminar con el modelo ALE en las dos siguientes gráficas (*fig.41 y fig.42*) se muestran las presiones experimentales y del ALE para poder compararlas.

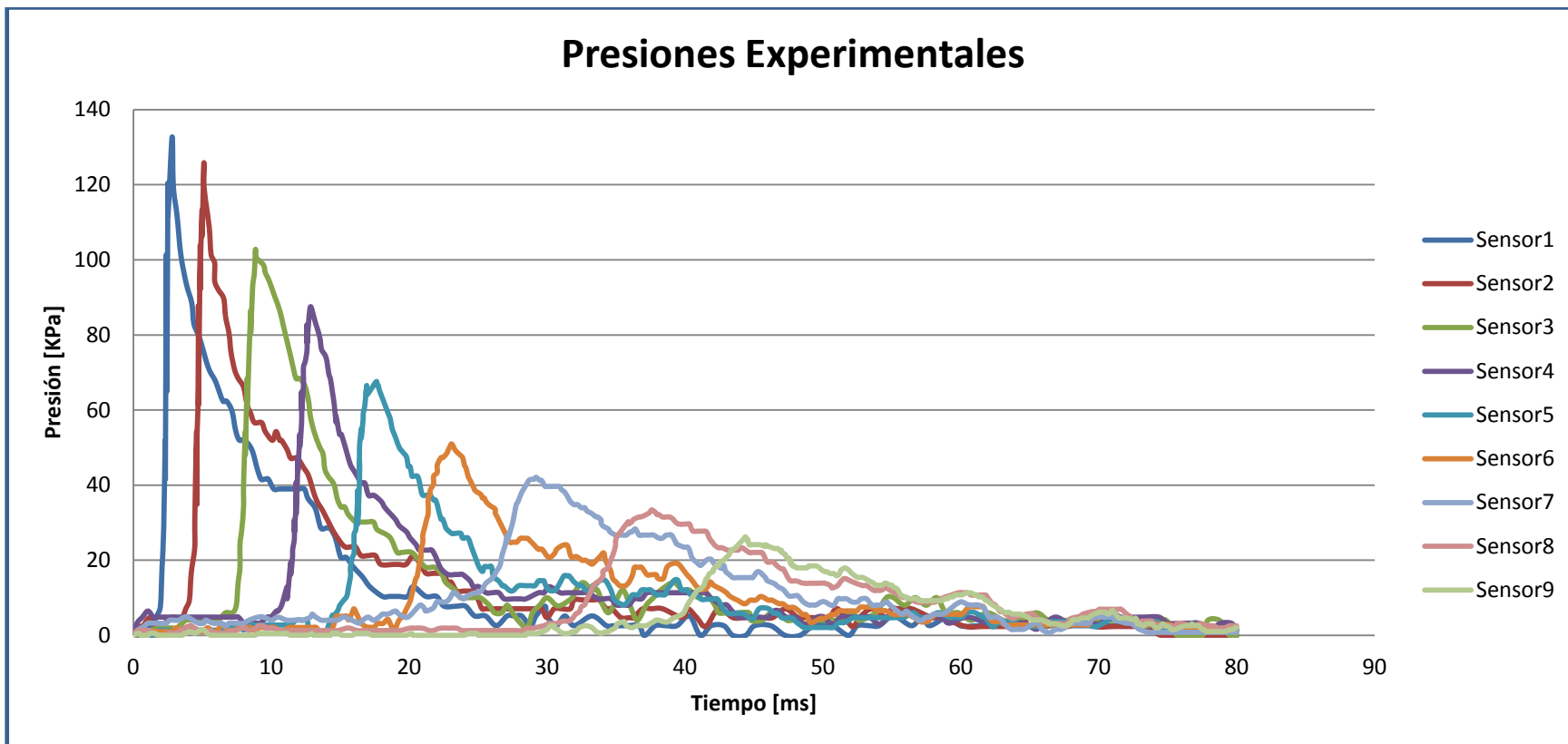


Figura 41. Presiones experimentales.

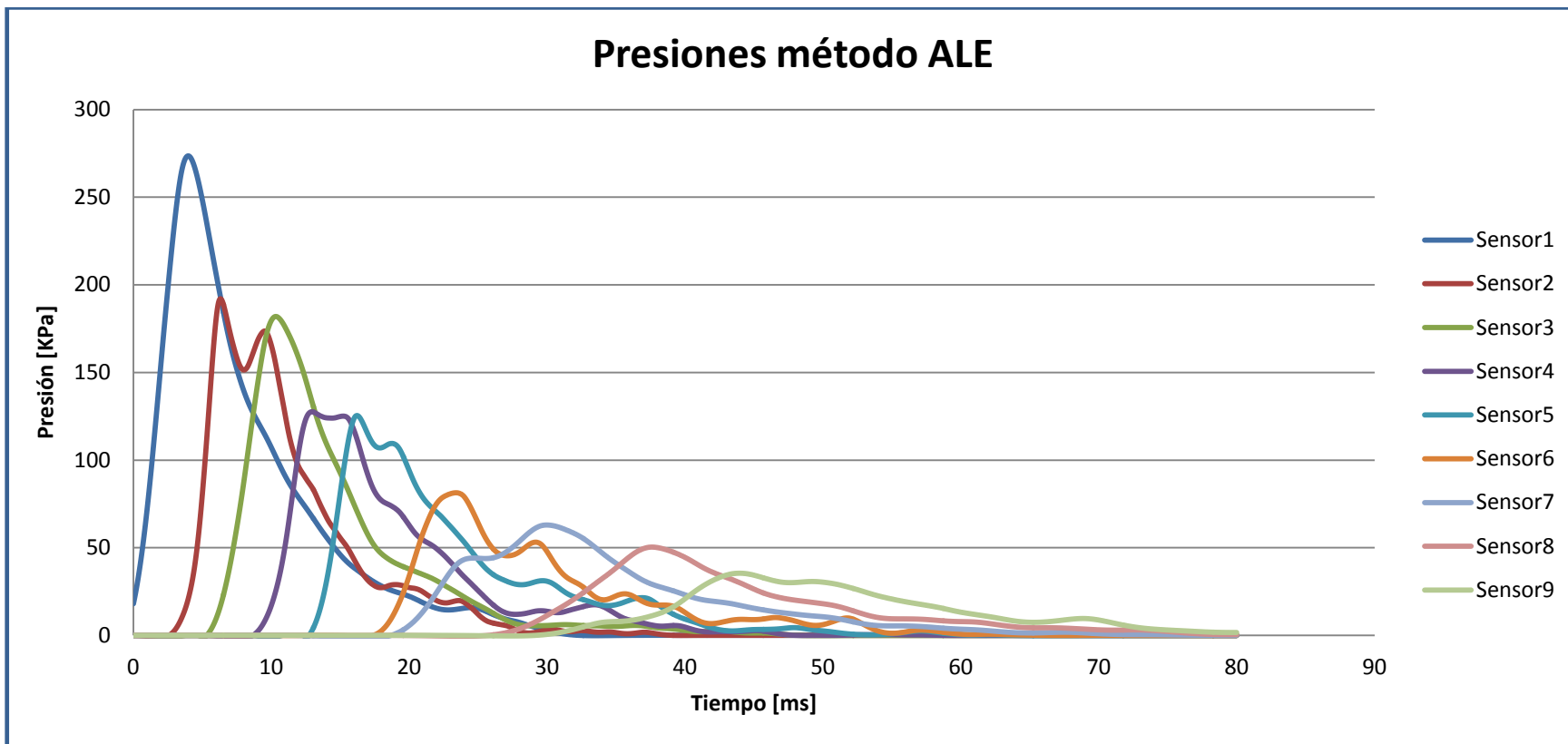


Figura 42. Presiones del método ALE.

3.2.4 Método SPH.

Para finalizar se mostrarán los resultados que se obtuvieron utilizando el método sin malla SPH. El mayor inconveniente encontrado con este método fue la imposibilidad de paralelizar el problema. La resolución de los modelos con los tres métodos anteriores se realizó de forma paralela en 23 cpus, lo que permitía aumentar sin problema el número de elementos del mallado ya que el tiempo de resolución era viable. Por el contrario el SPH no permitía dicha paralelización y los casos tenían que ser resueltos con una única cpu. Esta limitación provocó que no se pudiera realizar el ensayo más fino, lo que impidió ver las verdaderas posibilidades del método SPH. (Tabla 3).

Modelo	Nº Elementos
SPH Grueso	12673
SPH Medio	116763

Tabla 3. Elementos del método SPH.

No obstante se compararán y valorarán los resultados obtenidos con los ensayos grueso y medio. En la siguiente gráfica (fig.43) se muestra la diferencia existente entre la velocidad real de la cuña y la obtenida con los dos ensayos SPH a través de sus errores relativos.

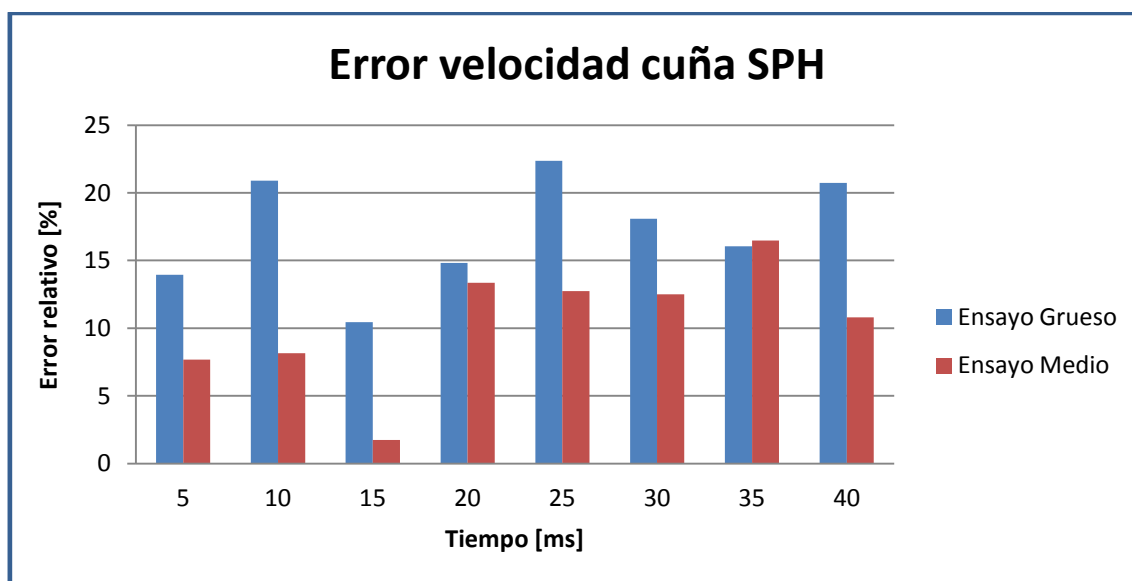


Figura 43. Error relativo en la velocidad de la cuña con el método SPH.

De la gráfica anterior se deduce que la similitud entre la curva real y las del SPH es grande, pues los errores relativos apenas llegan al 20% en el ensayo más grueso y en el medio son inferiores al 15%. Se puede ver también que la progresión desde el ensayo grueso al medio es claramente positiva pues todos los errores disminuyen de forma considerable. A la espera de los resultados de las presiones se puede decir que el método SPH también sería aceptable pese a haber empleado un número de elementos inferior.

A continuación se muestra la comparativa de las presiones máximas en los nueve primeros sensores de la cuña (*fig.44*):

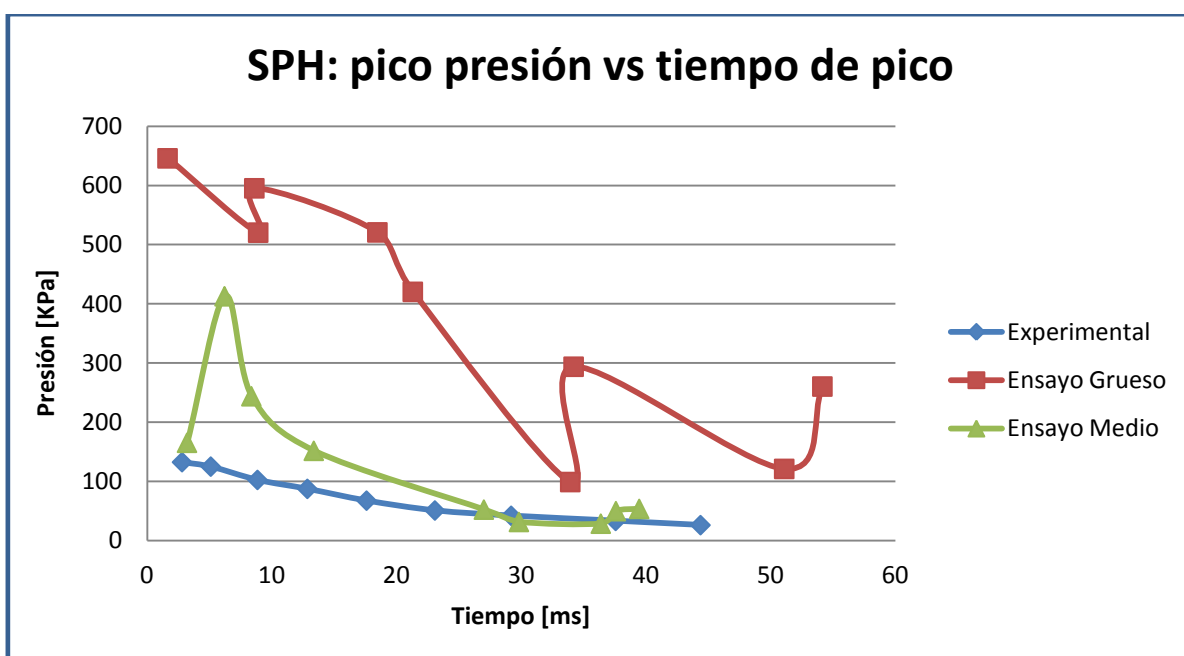


Figura 44. Presiones máximas en la cuña del método SPH.

Al contrario de lo que sucedía con la velocidad de la cuña las presiones generadas no se ajustan correctamente a la realidad. Aunque la evolución es buena, pues la mejora entre los dos ensayos es evidente, el tamaño de elementos usado en el caso medio no es suficiente.

Se muestran a continuación las gráficas de error relativo. En primer lugar, en la *figura 45*, están representados los picos de presión:

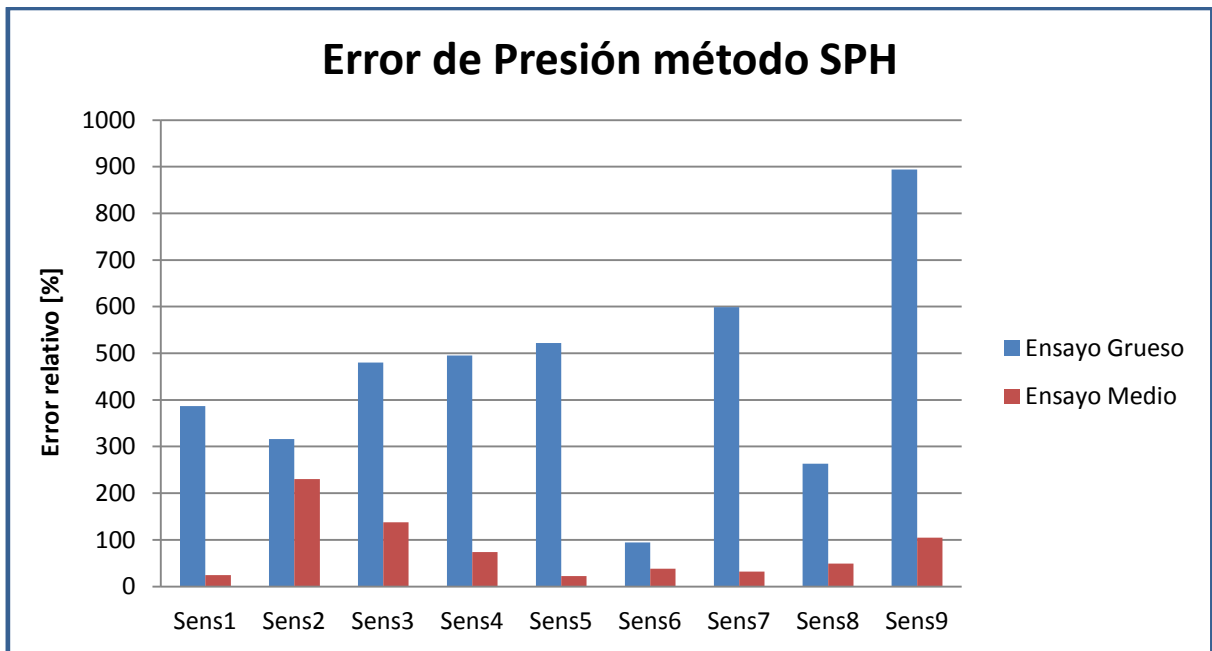


Figura 45. Error relativo en los picos de presión con el método SPH.

Se puede ver que el caso grueso es inviable, pero la progresión es buena. Aún así en el caso medio existen importantes diferencias entre los distintos sensores que harían que los resultados fueran imprecisos.

En cuanto a los errores en los tiempos de pico (*fig.46*):

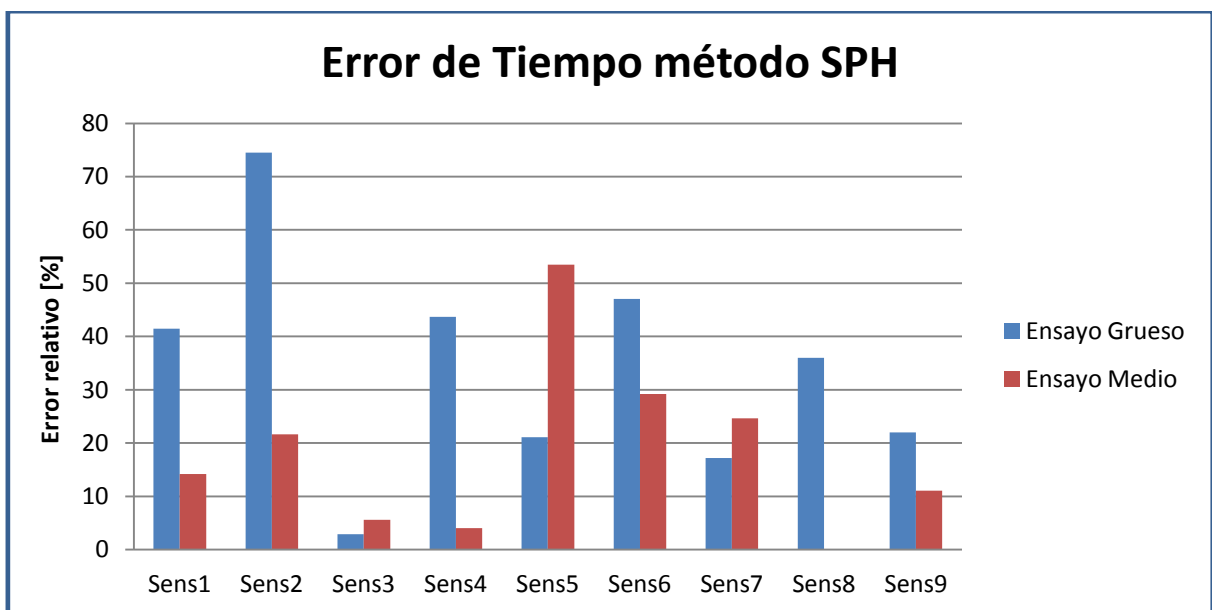


Figura 46. Error relativo en los tiempos de pico con el método SPH.

Si los resultados del caso medio eran más precisos en los picos de presión, no se puede decir lo mismo con los tiempos de pico. Las diferencias entre ambos se reducen y el principal problema es, una vez más, la variabilidad entre los distintos sensores.

Como conclusión final del modelo SPH se puede decir que ninguno de los dos ensayos son lo suficientemente buenos, y que no se aproximan a los resultados logrados con el Euleriano o el ALE. Sin embargo la progresión favorable desde el ensayo grueso al medio es más que evidente y los resultados que se podrían haber obtenido con un tercero más fino podrían haber sido realmente buenos. En cambio la limitación de no poder paralelizar el modelo para ser resuelto ha impedido ver el verdadero potencial del método SPH.

Por último se muestra el detalle del modelo SPH del ensayo grueso tras los 80 ms de simulación (*fig.47*):

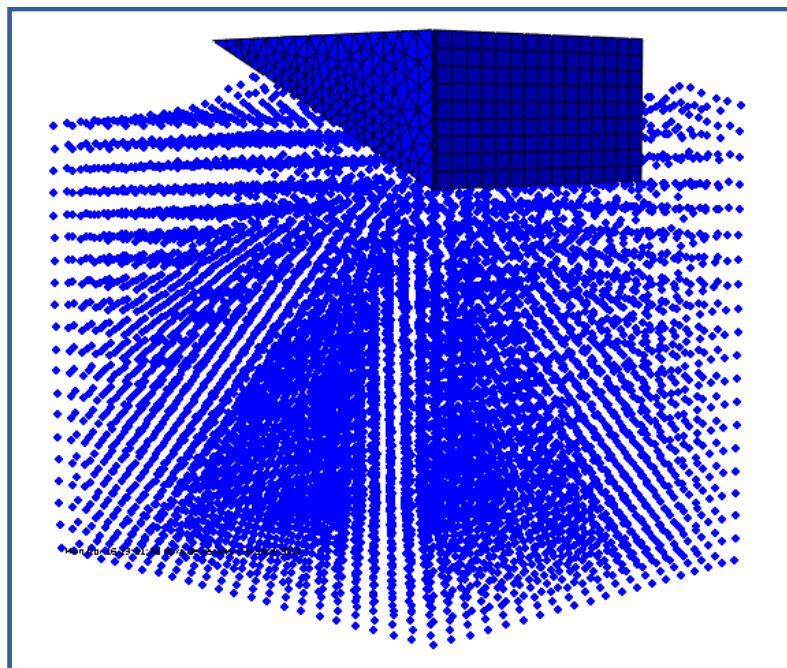


Figura 47. Ensayo grueso del modelo SPH.

3.2.5 Comparativa.

Una vez vistos y analizados los resultados obtenidos con los diferentes métodos numéricos, se pasará a compararlos entre sí de forma que se pueda elegir el más eficiente para este tipo de problemas de interacción fluido-estructura.

Como ya se demostró el método Lagrangiano no es un método válido para este tipo de problemas, pues no soporta grandes deformaciones. Por tanto en la comparativa se incluirá el mejor ensayo de los otros tres métodos numéricos; éstos son: *Euleriano Fino*, *ALE Fino* y *SPH Medio*.

En primer lugar se comparará la velocidad de la cuña a través del error relativo (fig.48):

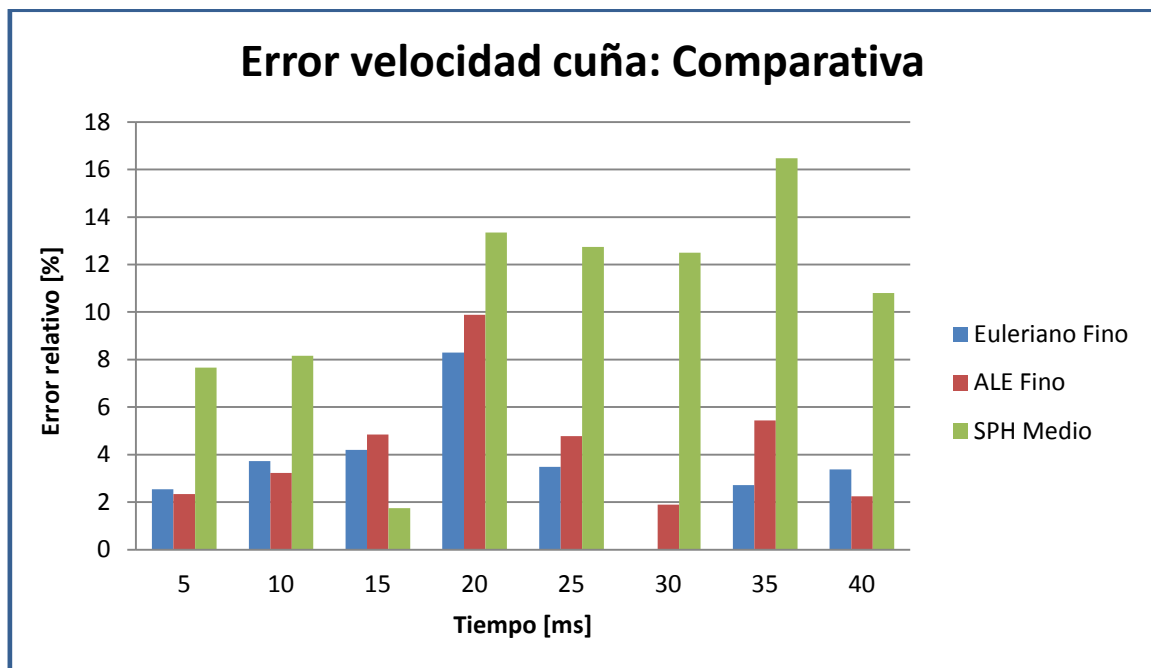


Figura 48. Comparativa del error relativo en la velocidad de la cuña.

A simple vista se puede ver que los resultados del SPH son peores que los otros dos, no obstante, si se representa la media del error relativo de los ocho puntos tomados (fig.49):

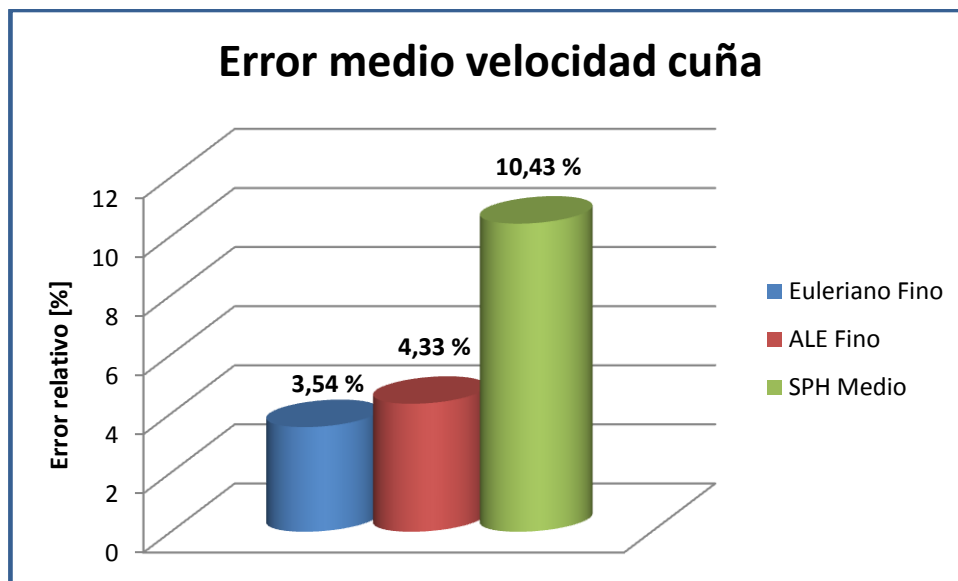


Figura 49. Comparativa de la media del error en la velocidad de la cuña.

Los mejores resultados obtenidos en la deceleración de la cuña proceden del método Euleriano. Se muestra a continuación que sucede con las presiones.

En la *figura 50* se encuentra el error relativo en los picos de presión:

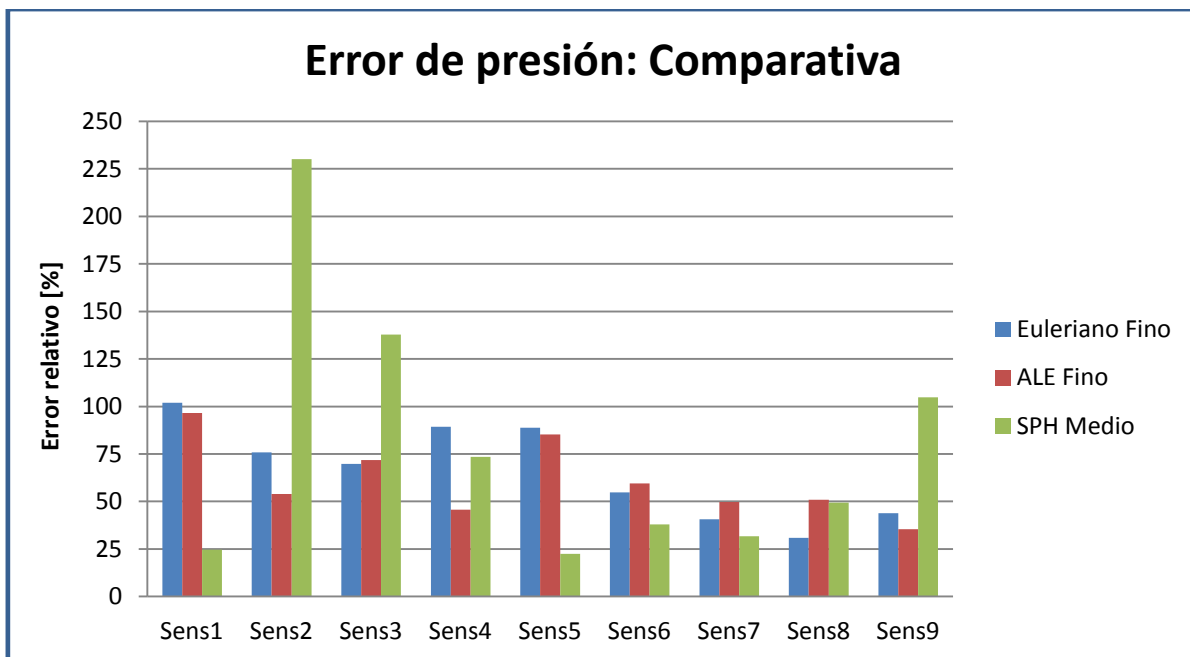


Figura 50. Comparativa del error relativo en los picos de presión.

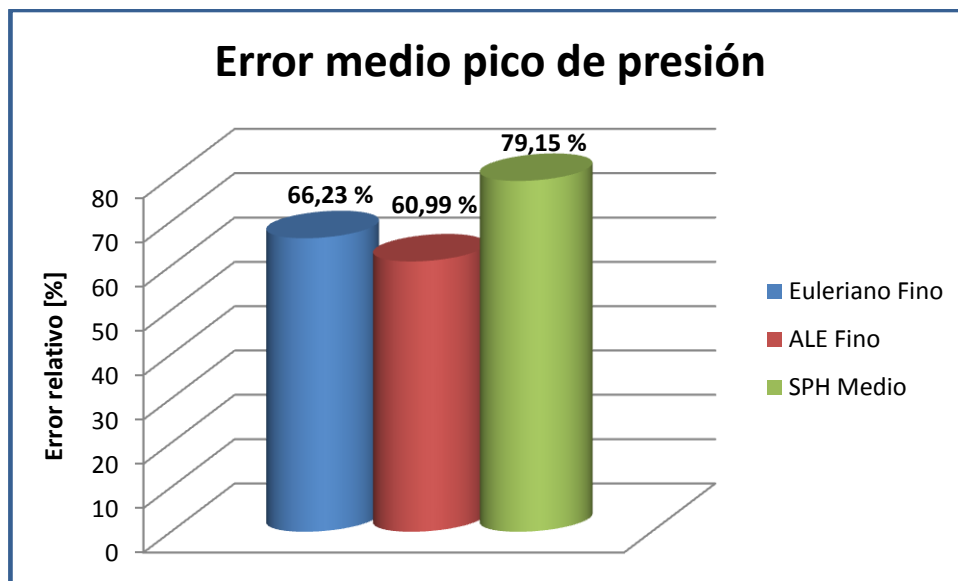


Figura 51. Comparativa de la media del error relativo en los picos de presión.

La media de los errores en los picos de presión de los nueve sensores (*fig.51*) muestra que el mejor método en este caso es el ALE, muy próximo al Euleriano. Nuevamente el SPH ofrece los peores resultados.

Si se comparan ahora los tiempos en que se producen dichos picos (*fig.52*):

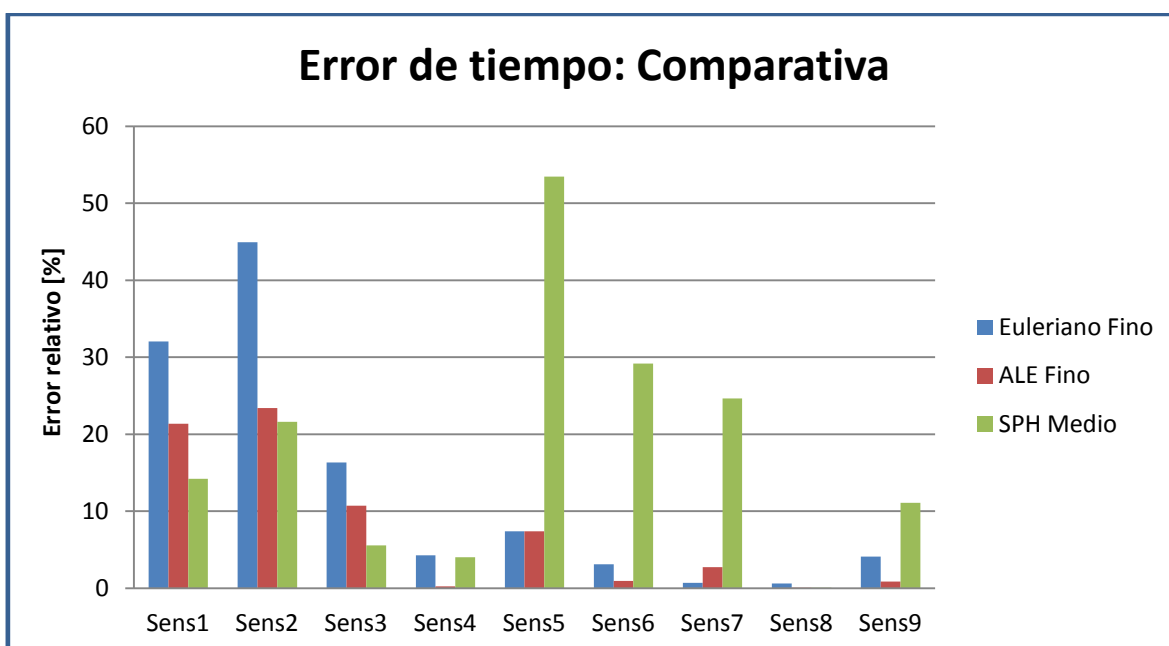


Figura 52. Comparativa del error relativo en los tiempos de pico.

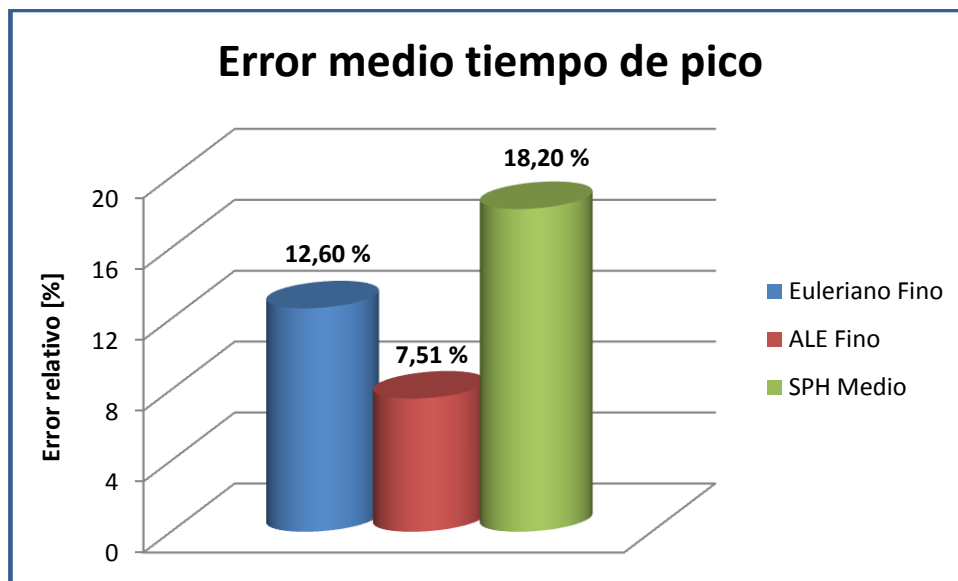


Figura 53. Comparativa de la media del error relativo en los tiempos de pico.

Como se puede ver en las dos gráficas anteriores el tiempo de pico se ajusta mejor a los resultados experimentales en el método ALE. Es el que tiene unos resultados más homogéneos y un valor medio más bajo con un 7,51% frente al 12,6% del Euleriano. Una vez más se puede observar en la *figura 53* como los peores resultados proceden del SPH, algo lógico por otra parte dado el menor número de elementos con que fue construido el modelo.

A la vista de los resultados analizados hasta el momento se podría decir que el SPH quedaría descartado como el mejor método. En cuanto a cual es mejor, si el Euleriano o el ALE, éste último parece tener una ligera ventaja, no obstante se va a estudiar el tiempo de computación ya que ambos consiguen resultados muy similares.

En la siguiente tabla (*Tabla 4*) se muestra el número de elementos y el tiempo de computación de cada uno de los modelos realizados en el proyecto:

Modelo	Nº Elementos	Tiempo [h]	Tiempo / Nº Elementos [s/elemento]
Lagrangiano	183072	-	-
Eul. Grueso	8898	2,80	1,13
Eul. Medio	41069	40,42	3,54
Eul. Fino	313401	235,03	2,70
ALE Grueso	7324	6,01	2,95
ALE Medio	32429	34,19	3,80
ALE Fino	248601	189,18	2,74
SPH Grueso	12673	2,26	0,64
SPH Medio	116763	12,93	3,67

Tabla 4. Tabla tiempo de computación.

En la tabla se puede ver la evolución creciente del tiempo a medida que se aumenta el número de elementos del modelo. En la última columna se encuentra la relación entre ambas variables, la cual es similar para los métodos Euleriano y ALE; sin embargo el hecho de que en el ALE los elementos se vayan desplazando, de la forma definida por el usuario, con la deformación del material supone un ahorro importante con respecto al Euleriano. De esta forma, con un 20% menos de elementos de malla en el ALE se consiguen unos resultados similares, e incluso, ligeramente superiores al Euleriano.

Esta disminución en el número de elementos lleva asociado un descenso en el tiempo de resolución. Los resultados se muestran gráficamente en la siguiente figura (fig.54):

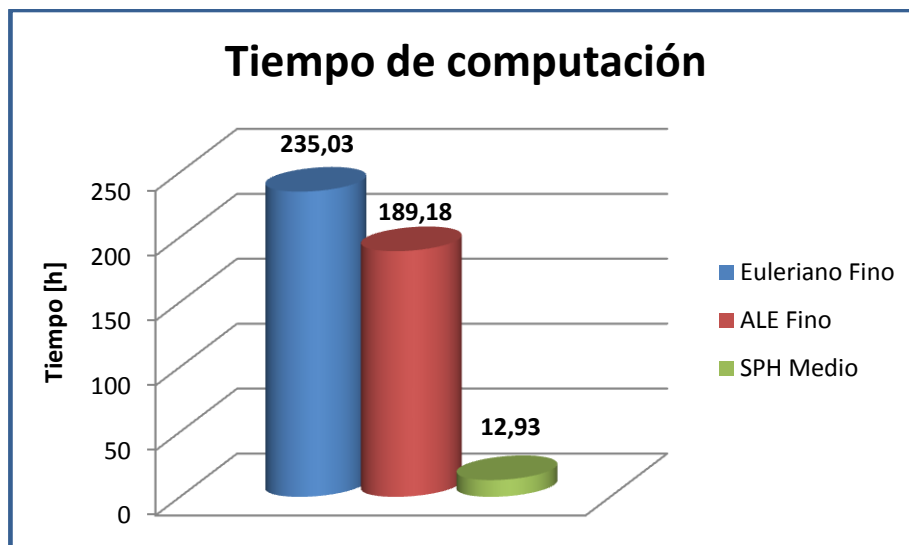


Figura 54. Comparativa del tiempo de computación.

Aunque se observa que el SPH ofrece, con una gran diferencia, el menor tiempo de cálculo de los tres modelos no se puede aceptar éste como el mejor ya que los resultados conseguidos son considerablemente peores. Como ya se comentó los resultados del ALE son ligeramente mejores que los del Euleriano, pero además el tiempo de cálculo se reduce en un 20%. Por todo ello se puede concluir que el modelo que mejor se adapta a nuestro problema de interacción fluido-estructura es el mallado fino del método ALE.

Por último se muestra una tabla resumen con todos los resultados obtenidos en la comparativa (Tabla 5):

	Euleriano Fino	ALE Fino	SPH Medio
Error medio Velocidad Cuña [%]	3,54	4,33	10,43
Error medio Pico Presión [%]	66,23	60,99	79,15
Error medio Tiempo Pico [%]	12,60	7,51	18,20
Tiempo de computación [h]	235,03	189,18	12,93

Tabla 5. Tabla resumen.

3.2.6 Análisis del impacto.

Una vez se han analizado los diferentes métodos numéricos y se ha escogido la malla fina del método ALE como la más precisa para el problema a resolver, se pasará a estudiar el comportamiento del agua ante al impacto de la cuña en dicho caso.

En la *figura 55* se muestra la evolución del impacto desde una vista lateral. Se puede apreciar como el desplazamiento del agua es suave, adaptándose a la entrada de la cuña. También se puede observar como a partir de los 40 ms una parte del fluido se desprende a mayor velocidad.

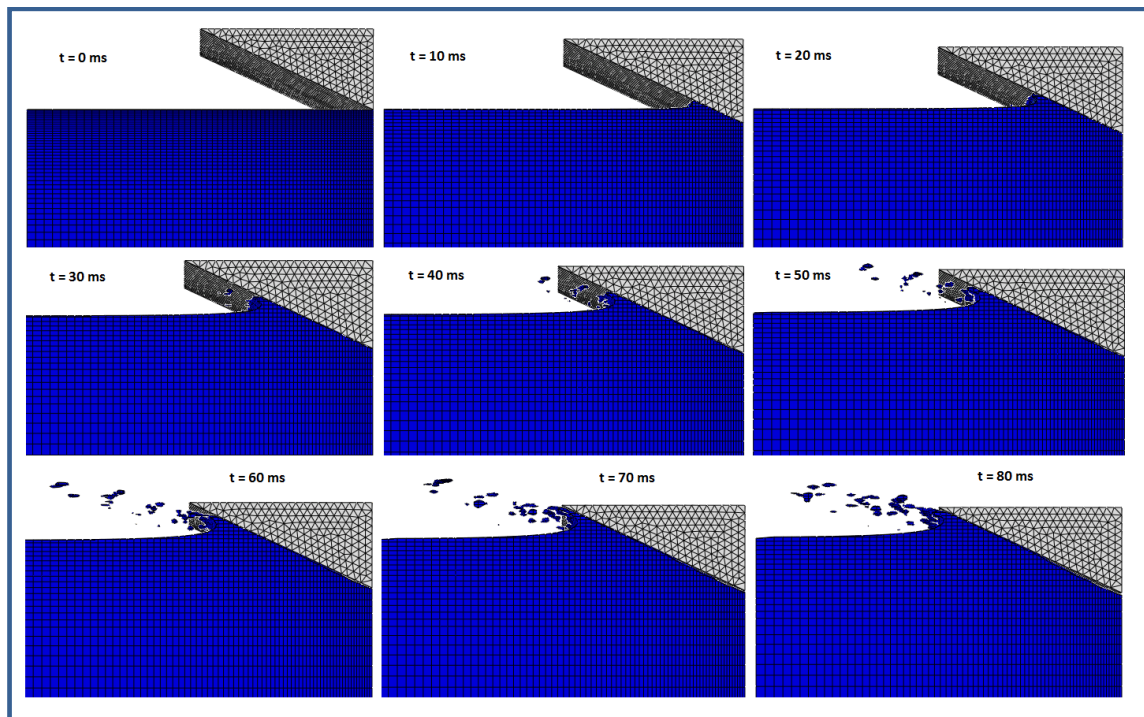


Figura 55. Evolución lateral del impacto del caso ALE fino.

Por su parte, en la *figura 56* se muestra la evolución del impacto visto desde la parte posterior. En este caso a medida que penetra la cuña en el fluido éste se desplaza generando una cavidad. Esto es debido a que el ángulo de choque con la cuña se produce a 90° .

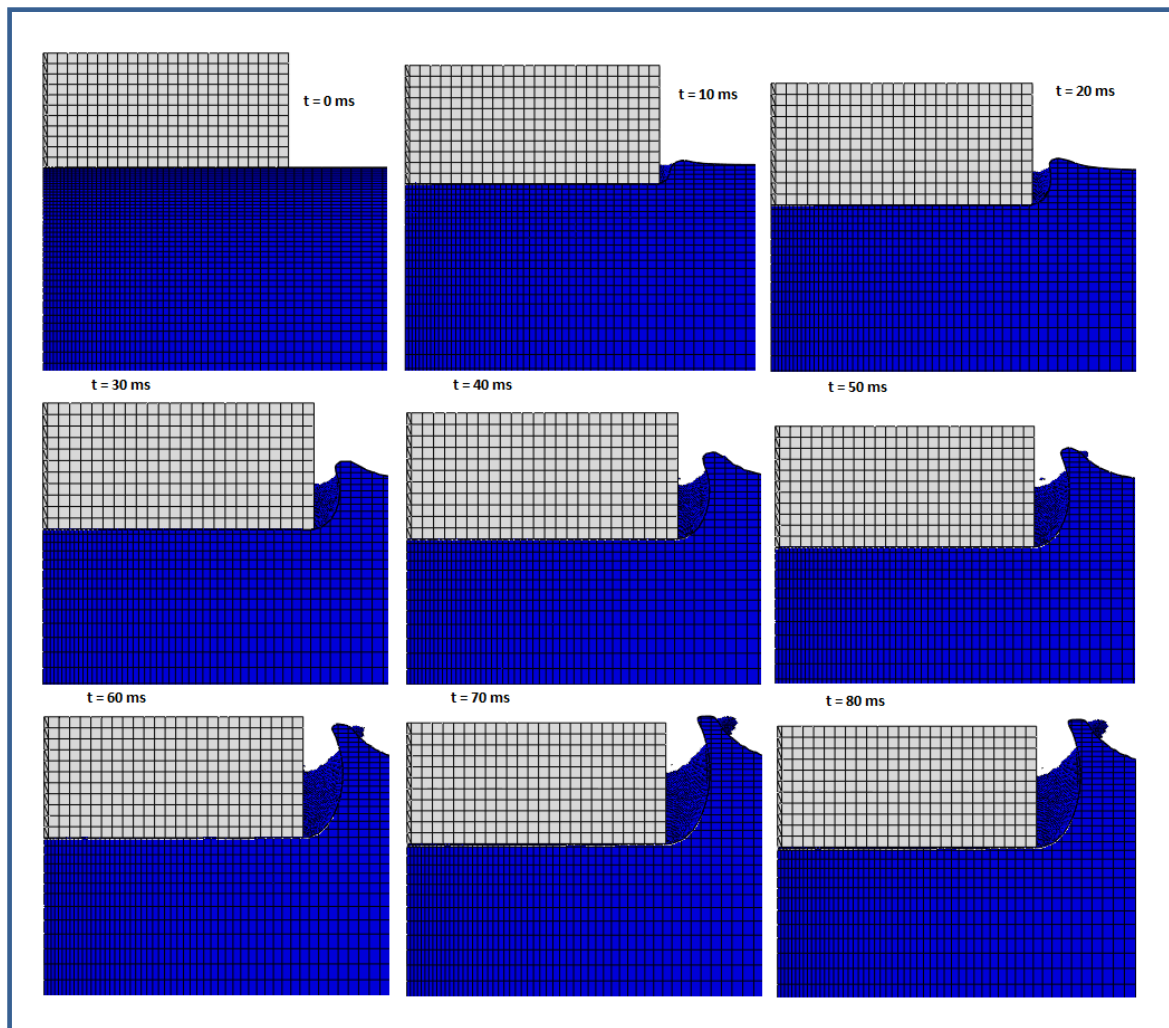


Figura 56. Evolución posterior del impacto del caso ALE fino.

Es interesante observar cómo el ángulo con que la superficie impacta en el agua genera distintas respuestas en ella. Así, el impacto plano de la pared posterior genera una cavidad, mientras que una superficie inclinada genera un impulso en forma de ola.

Si se compara la *figura 55* con la *figura 57*, recogida del artículo “Hydroelasticity in water-entry problems: Comparison between experimental and SPH results” [17], el cual consiste en el impacto de una placa de aluminio en forma de cuña contra un depósito de agua, se pueden apreciar las similitudes entre ambos. En los dos casos la penetración del cuerpo en el fluido se realiza de forma tangencial a causa de la forma de cuña de los sólidos y además se observa como al impactar el cuerpo, parte del fluido se desprende de la masa de agua por la parte superior de la cuña.

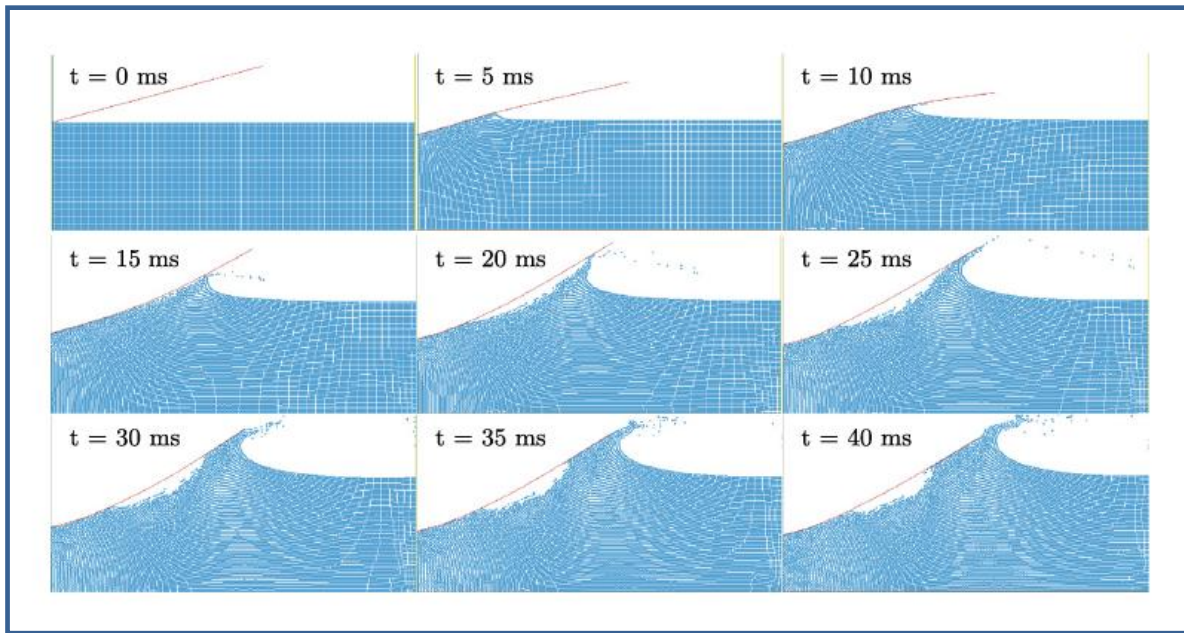


Figura 57. Evolución lateral del impacto de placa de aluminio. [17]

Sin embargo en el caso mostrado en la *figura 57* se puede ver como a partir de los 20 ms se empieza a generar una masa de aire entre la placa de aluminio y el fluido, algo que no ocurría en el problema de la cuña de madera, donde el contacto entre el fluido y la estructura era permanente. Esto se debe al hecho de que la cuña de madera presenta una estructura más robusta que la placa de aluminio, la cual sufre una deformación elástica importante a causa del impacto produciendo la cavidad que se muestra en la figura.

Por último en la *figura 58* se aprecia la onda de presión generada por el impacto de la cuña de madera. Esta onda tiene forma hemisférica y se puede observar cómo al desplazarse va perdiendo intensidad debido a que la magnitud de la presión se reduce con el cuadrado de la distancia a su fuente.

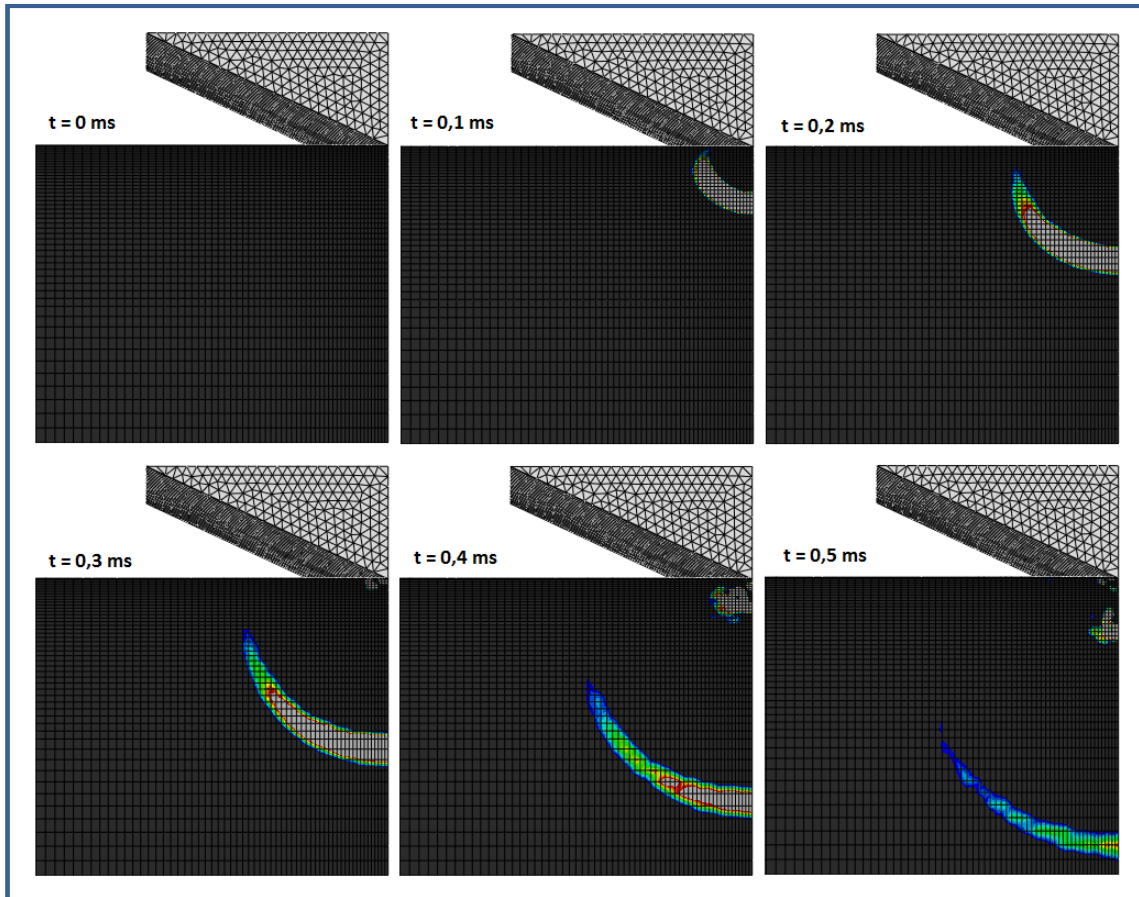


Figura 58. Evolución onda de presión del caso ALE fino.

Si se calcula la velocidad de propagación de la onda que se ha obtenido:

$$v = \frac{s}{t} = \frac{0,7134 \text{ m}}{0,5 \text{ ms}} \rightarrow v = 1426,8 \text{ m/s}$$

Donde $s = 0,7134 \text{ m}$ es la distancia desde el foco emisor hasta la onda para $t = 0,5 \text{ ms}$. El valor obtenido está muy próximo al valor analítico de la velocidad de propagación de las ondas en el agua, $v = 1448 \text{ m/s}$.

CAPÍTULO 4

MODELO APOLLO

4.1 MOTIVACIÓN

Tras el estudio del problema de la cuña se pasará a simular un caso real en el mundo aeroespacial, el amerizaje de la cápsula Apollo.

Hoy en día la ciencia aeroespacial va orientada a sustituir los clásicos transbordadores (*fig.59*) que han prestado servicio durante más de treinta años por cápsulas tripuladas. Una de las grandes diferencias entre ambos es la forma de regresar a la Tierra ya que mientras los primeros aterrizaban como un avión más, las segundas deben hacerlo en el mar mediante un amerizaje controlado. El programa Orion de la NASA [13] que está actualmente en desarrollo planea enviar astronautas al espacio en 2016. Hasta el momento la cápsula sólo ha realizado un viaje tripulado, puramente terrestre, en el año 2011 y está previsto que se realice el primer viaje espacial no tripulado en 2013.



Figura 59. Transbordador Atlantis.

Precisamente el día 31 de mayo de 2012 amerizó a 800 Km de Los Ángeles la cápsula Dragón C2 (*fig.60*). Este viaje no tripulado, llevado a cabo por una empresa privada, duró 9 días y 8 horas en los cuales trasladó carga a la Estación Espacial Internacional y regresó con material procedente de muestras y experimentos [12].



Figura 60. Cápsula Dragón C2 antes y después de la misión espacial.

Sin embargo la cápsula más importante de toda la historia fue la que llevó a Neil A. Armstrong, Edwin E. Aldrin Jr, y Michael Collins a la Luna el 21 de Julio de 1969. La cápsula Apollo (*fig.61*), sobre la cual se realizará el ensayo con Abaqus.



Figura 61. Cápsula Apollo.

Tras la exitosa misión la cápsula pierde los demás módulos e inicia en solitario el regreso a la Tierra. Al entrar en la atmósfera a unos 40000 Km/h empieza a frenar bruscamente a causa del rozamiento, disminuyendo su velocidad hasta unos pocos cientos, suficiente para abrir los paracaídas sin riesgo de rotura.

La enorme pérdida de energía cinética que se produce a causa de la deceleración se transforma en calor, lo que propicia que la cápsula alcance temperaturas de hasta 3000 °C (*fig.62*).



Figura 62. Cápsula Orión entrando en la atmósfera.

El descenso controlado por los paracaídas hace que el impacto contra el agua se produzca a unos 30 Km/h.

Además de las presiones de impacto que sufre la cápsula al caer al agua (las cuales no son objeto de estudio de este proyecto) la otra variable importante es la aceleración que se genera, y que deberán soportar los tripulantes. Es fundamental conocer con exactitud las aceleraciones a las que van a estar expuestos ya que valores extremos podrían resultar peligrosos. Un individuo entrenado puede llegar a soportar aceleraciones longitudinales de hasta 9 g's y transversales de 20 g's [11].

En función de cómo se produzca el impacto contra el agua el valor de dichas aceleraciones puede variar considerablemente. Por ello resulta vital controlar el ángulo de caída, para lo cual se realizan diferentes experimentos y simulaciones.

La última parte del proyecto trata precisamente de este hecho, es decir, de comprobar que aceleraciones sufrirá la cápsula Apollo en función del ángulo de impacto.

4.2 ESTUDIOS PREVIOS

El estudio del amerizaje de la nave Apollo será contrastado con resultados previos procedentes tanto de simulaciones reales como de ensayos numéricos realizados en Abaqus [9] y [10].

La geometría de la cápsula es la que se muestra a continuación (*fig.63*):

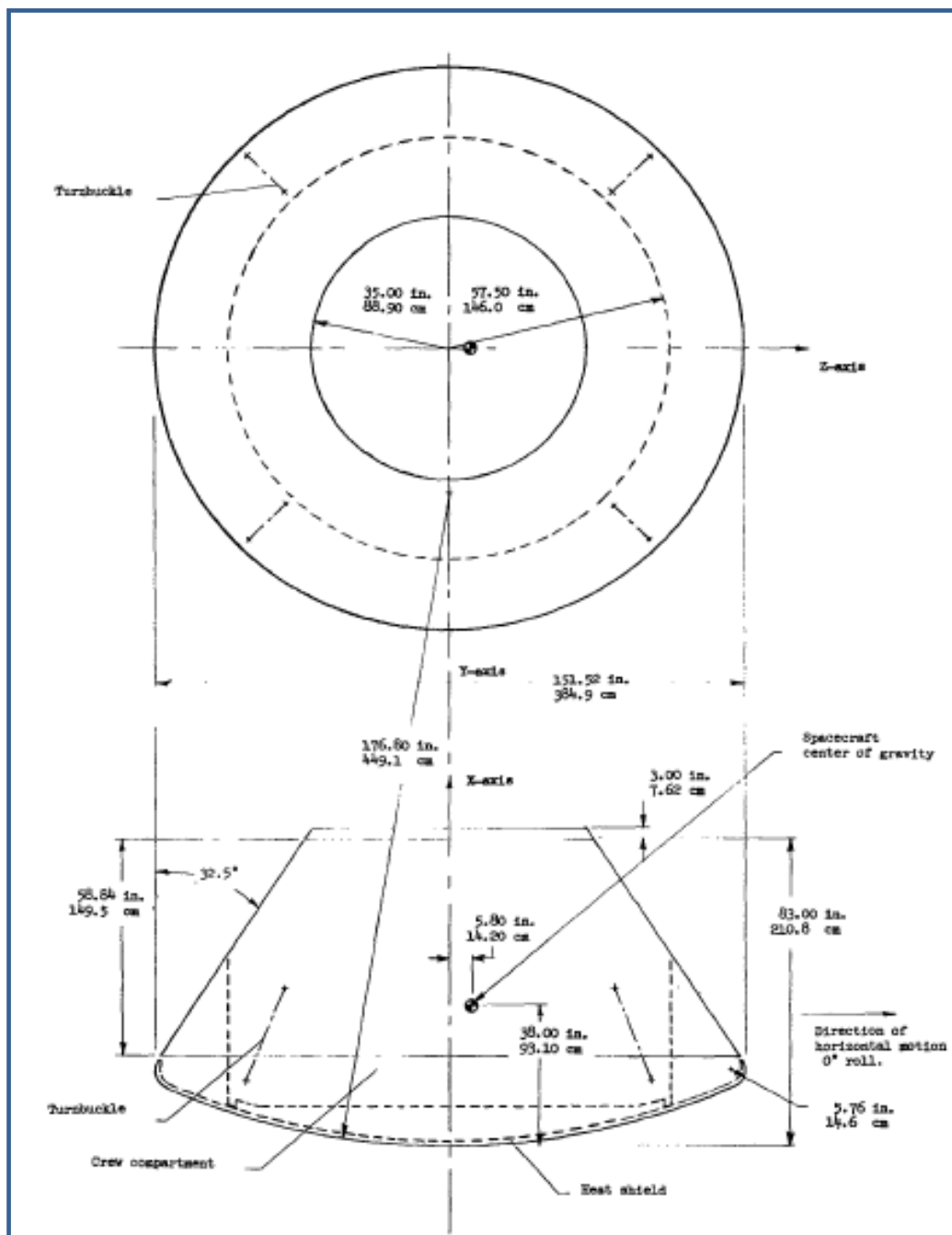


Figura 63. Geometría de la cápsula Apollo. [10]

Se realizarán cinco ensayos diferentes en los que se irá variando el ángulo de ataque (*pitch*) y se comprobarán las aceleraciones longitudinal, normal y angular en cada uno de ellos.

Los cuatro primeros ensayos se simularán con una velocidad de caída únicamente vertical, mientras que el quinto llevará velocidad tanto vertical como horizontal.

En la siguiente tabla (*Tabla 6*) se muestran a modo de resumen los resultados que se obtuvieron tanto en el ensayo experimental como en la simulación numérica de SIMULIA [9] y [10].

CASO		1	2	3	4	5
Velocidad Vertical [m/s]		9,69	9,51	9,27	9,08	9,27
Velocidad Horizontal [m/s]		0	0	0	0	14,94
Pitch [grados]		14	25	30	39	20
Experimental	Normal [g]	31,1	12,4	7,2	4,1	16,6
	Longitudinal [g]	6,3	4,9	2,9	1,9	5,7
	Angular [rad/s ²]	155	72	54	29	121
SIMULIA	Normal [g]	31	12,7	7,5	4,4	16,6
	Longitudinal [g]	6,9	4,2	2,3	1,7	7,5
	Angular [rad/s ²]	152,8	87,1	52,5	34,9	123,8

Tabla 6. Tabla de resultados previos cápsula Apollo.

Los valores de aceleraciones así como el ángulo de giro de la nave estarán referenciados respecto de un sistema de ejes coordenados local con origen en el centro de gravedad de la cápsula (*fig.64*).

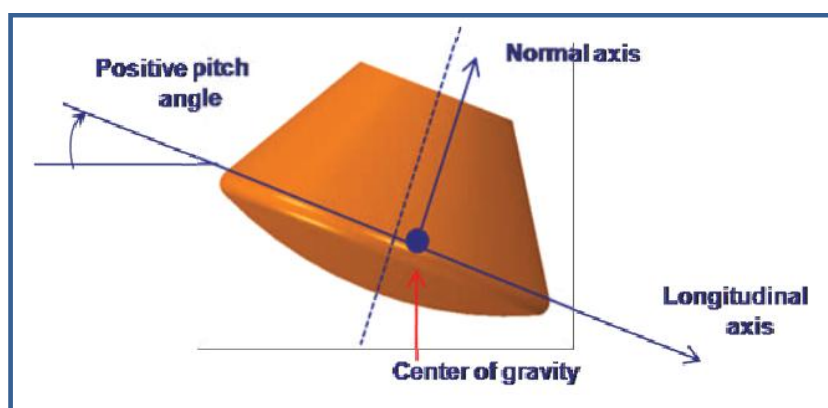


Figura 64. Sistema de coordenadas local Apollo. [9]

4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

La experiencia del problema de la cuña ha servido para comprender que los mejores métodos para resolver un problema de interacción fluido-estructura son el Euleriano y el ALE, y en el caso de que el tiempo de computación fuera determinante nos quedaríamos con el ALE.

En la situación de la nave Apollo el tiempo de cálculo no es un problema ya que el sólido será simulado como un cuerpo rígido. Esto implica que no es necesario el cálculo de las tensiones sino que sólo se obtendrán parámetros cinemáticos tales como la posición o la aceleración, que es lo que en este caso interesa. Esto supone una gran ventaja puesto que el tiempo de cálculo va a ser despreciable.

Este hecho, unido a que la simulación de SIMULIA fue realizada con el método Euleriano hace que se opte por dicho método para realizar las simulaciones [9].

4.3.1 Ensayos verticales.

En primer lugar se compararán y analizarán los resultados de los cuatro primeros casos, por ser de la misma morfología pero variando únicamente el ángulo de caída.

Las dimensiones del agua representada dejan a cada lado de la nave 2 metros y 6 de profundidad para que la onda pueda transmitirse y no influyan las condiciones de frontera. Finalmente se optó por este tamaño tras simular el caso 1 dejando a cada lado de la nave 2, 3 y 4 metros de agua, y comprobar que los resultados obtenidos no variaban.

En la siguiente figura (*fig.65*) se muestra la geometría de las cuatro primeras simulaciones, en el caso concreto de la cápsula Apollo cayendo con un ángulo de 30° (caso 3).

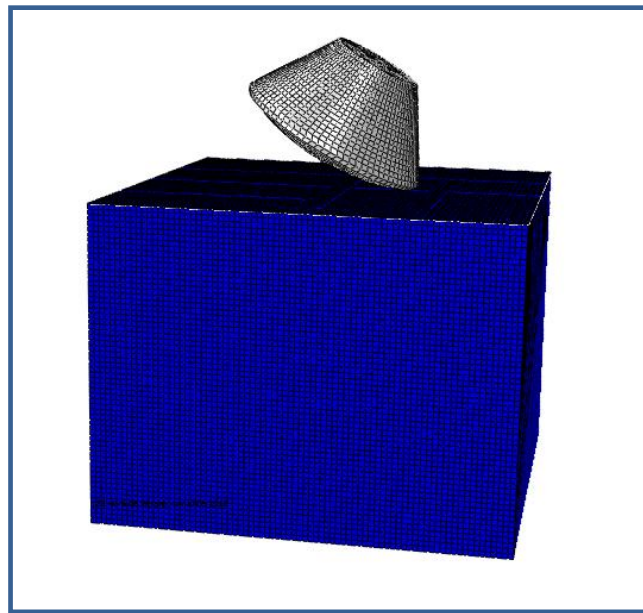


Figura 65. Posición inicial del Caso 3.

El tiempo de simulación en los cuatro ensayos fue de 0,25 s tras los cuales el caso 3 queda como se puede ver en la *figura 66*. Este tiempo es suficiente para poder obtener las aceleraciones máximas que sufrirá la nave. No obstante para poder observar los picos de aceleración las curvas tuvieron que ser previamente filtradas mediante el filtro de paso bajo de Butterworth de modo que se eliminara el ruido numérico de las altas frecuencias.

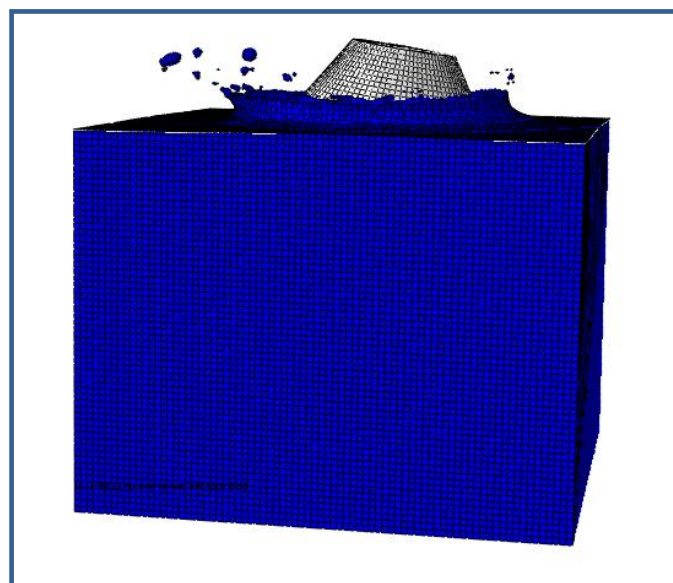


Figura 66. Posición final del Caso 3.

En la siguiente tabla (*Tabla 7*) se recogen todos los datos obtenidos en los cuatro ensayos, en la fila Simulación, de modo que se pueden comparar tanto con los valores experimentales como con los de SIMULIA.

CASO		1	2	3	4
Velocidad Vertical [m/s]		9,69	9,51	9,27	9,08
Velocidad Horizontal [m/s]		0	0	0	0
Pitch [grados]		14	25	30	39
Experimental	Normal [g]	31,1	12,4	7,2	4,1
	Longitudinal [g]	6,3	4,9	2,9	1,9
	Angular [rad/s ²]	155	72	54	29
SIMULIA	Normal [g]	31	12,7	7,5	4,4
	Longitudinal [g]	6,9	4,2	2,3	1,7
	Angular [rad/s ²]	152,8	87,1	52,5	34,9
Simulación	Normal [g]	29,5	12,02	7,36	5,2
	Longitudinal [g]	7,15	4,26	2,63	1,38
	Angular [rad/s ²]	156,4	98,7	64,8	36,25

Tabla 7. Tabla de resultados de los cuatro experimentos verticales.

A continuación se muestra gráficamente la evolución de cada una de las aceleraciones con el ángulo de caída tanto del caso experimental como de las simulaciones realizadas (*fig.67, fig.68 y fig.69*).

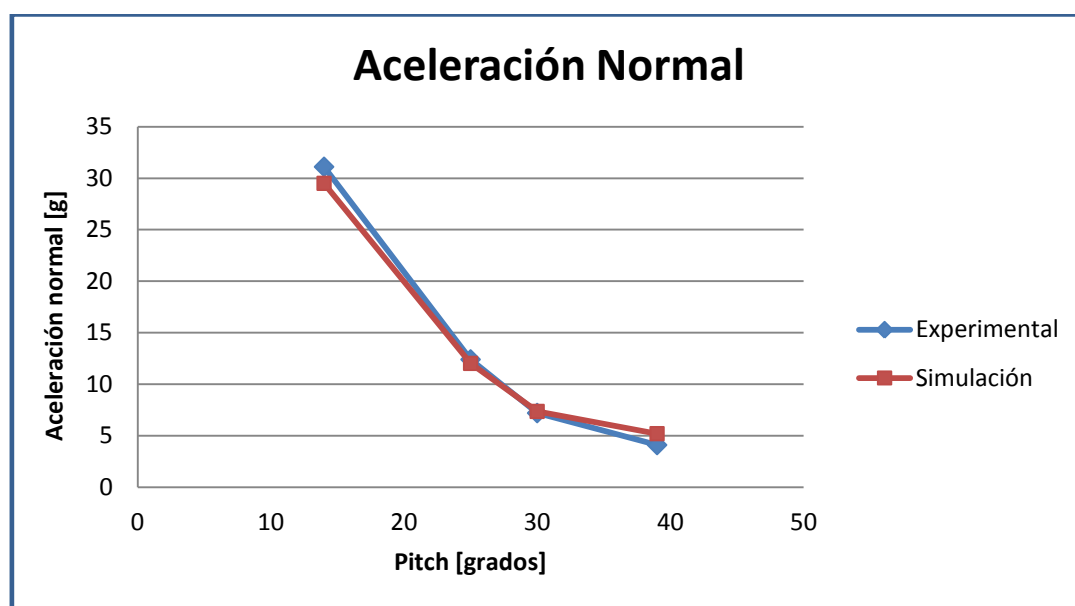


Figura 67. Evolución de la aceleración normal con el ángulo de caída.

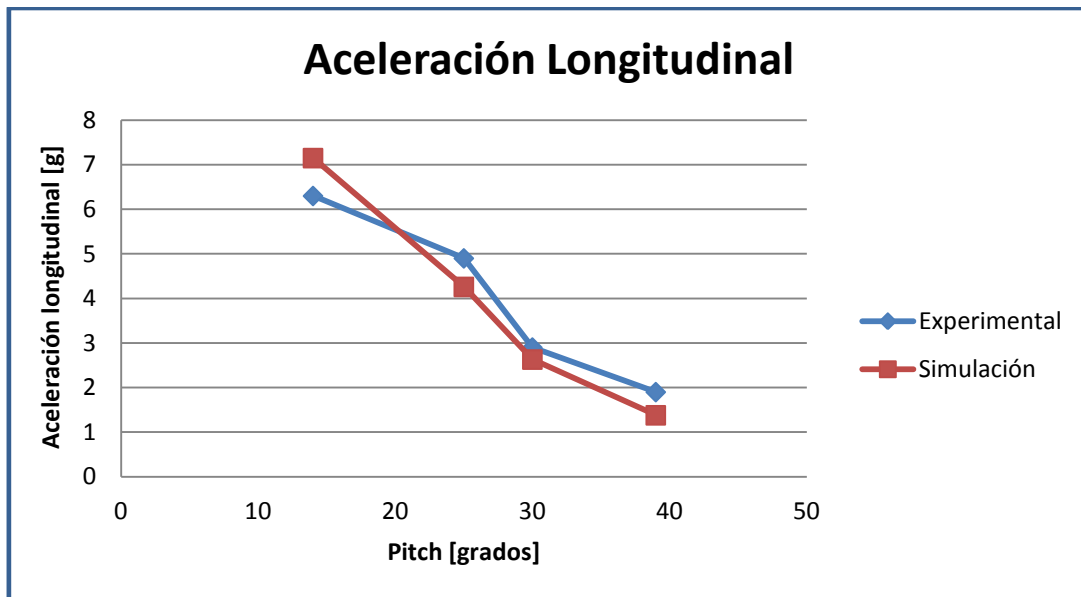


Figura 68. Evolución de la aceleración longitudinal con el ángulo de caída.

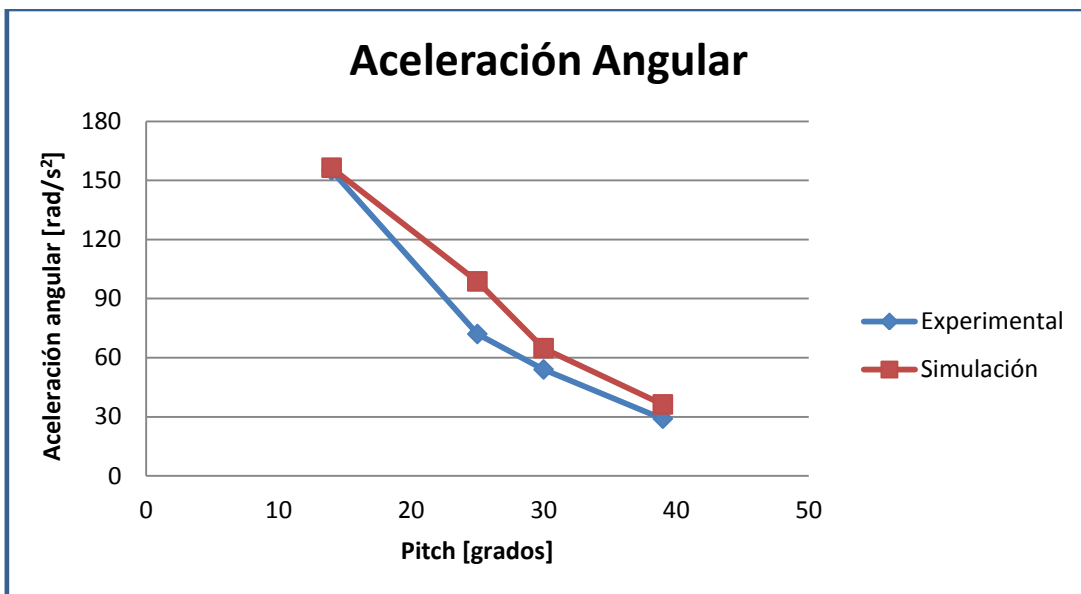


Figura 69. Evolución de la aceleración angular con el ángulo de caída.

La similitud de los resultados obtenidos con los esperados es bastante grande. Se puede ver como la tendencia general de las tres aceleraciones es a disminuir según aumenta el ángulo, y esta caída es más pronunciada cuando los ángulos son pequeños.

Esto es algo lógico, pues el amerizaje a grandes ángulos se produce a modo de cuña mientras que con ángulos pequeños la superficie de contacto en el impacto es muy grande, lo que producirá unas bruscas deceleraciones.

Además se observa que las aceleraciones normales son mayores que las longitudinales. Si los tripulantes fueran sentados en posición horizontal la aceleración más importante que tendrían que soportar sería la aceleración normal en su dirección longitudinal. Como ya se vio una persona entrenada puede llegar a soportar hasta 9 g's en su dirección longitudinal, y dado que las aceleraciones son mayores, dicha posición podría resultar peligrosa. Por este motivo la posición de los astronautas en la cápsula es la que se muestra en la *figura 70*. De esta forma la aceleración normal la sufren en su dirección transversal, en la cual pueden llegar a soportar hasta 20 g's.

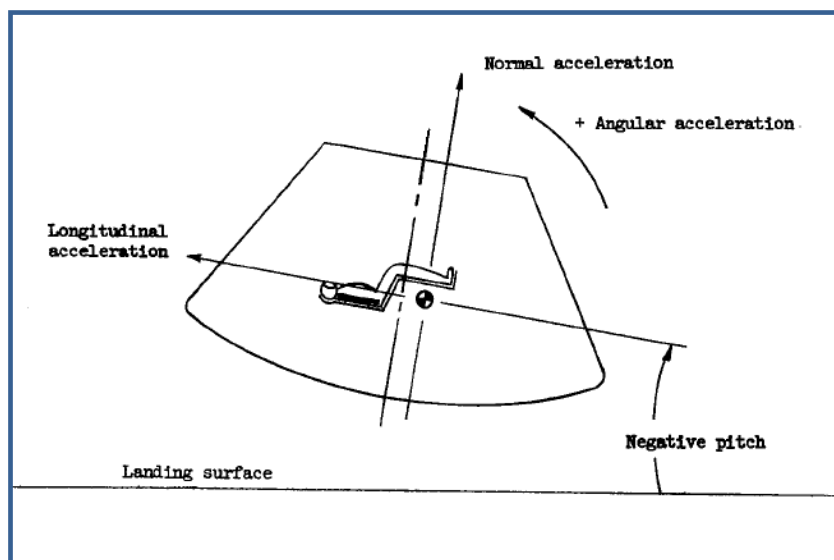


Figura 70. Posición de los tripulantes en la cápsula. [10]

Atendiendo a las limitaciones físicas de 9 g's en la dirección longitudinal y 20 g's en la transversal vemos que un amerizaje de la cápsula a 14° podría resultar peligroso, pues las aceleraciones normales que se generan son de 31,1 g's. Por este motivo el caso 1 debería ser descartado.

Si se calcula, al igual que se hizo en el problema de la cuña, el error relativo cometido con el ensayo experimental se obtienen los siguientes valores (*Tabla 8*):

CASO		1	2	3	4
Error relativo [%]	Normal [g]	5,14	3,06	2,22	26,83
	Longitudinal [g]	13,49	13,06	9,31	27,37
	Angular [rad/s ²]	0,90	37,08	20,00	25,00

Tabla 8. Tabla resumen error relativo.

Se observa como por lo general los resultados se asemejan mucho a los del ensayo experimental. Especialmente buenos son los obtenidos en las aceleraciones normal y longitudinal, que por otro lado son las más críticas para los astronautas.

4.3.2 Ensayo con velocidad combinada (Caso 5).

Por último se decidió simular, a modo de prueba, el caso 5 del experimento para observar el comportamiento de la nave ante un amerizaje no totalmente vertical sino con una componente horizontal de la velocidad.

En este caso la morfología del agua en Abaqus tuvo que ser modificada ya que la cápsula tendría un mayor recorrido. Por ello las dimensiones del elemento fluido son 12,85 x 7,85 x 6 m³, quedando el ensayo como se muestra en la *figura 71*.

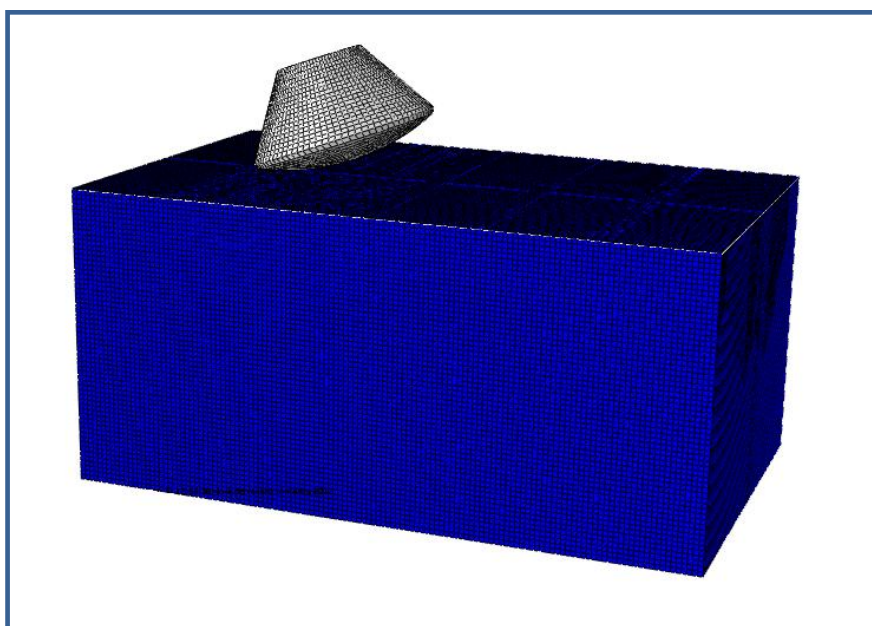


Figura 71. Posición inicial del Caso 5.

Del mismo modo, tras la simulación de los 0,75 s el modelo quedó como se muestra a continuación (*fig.72*):

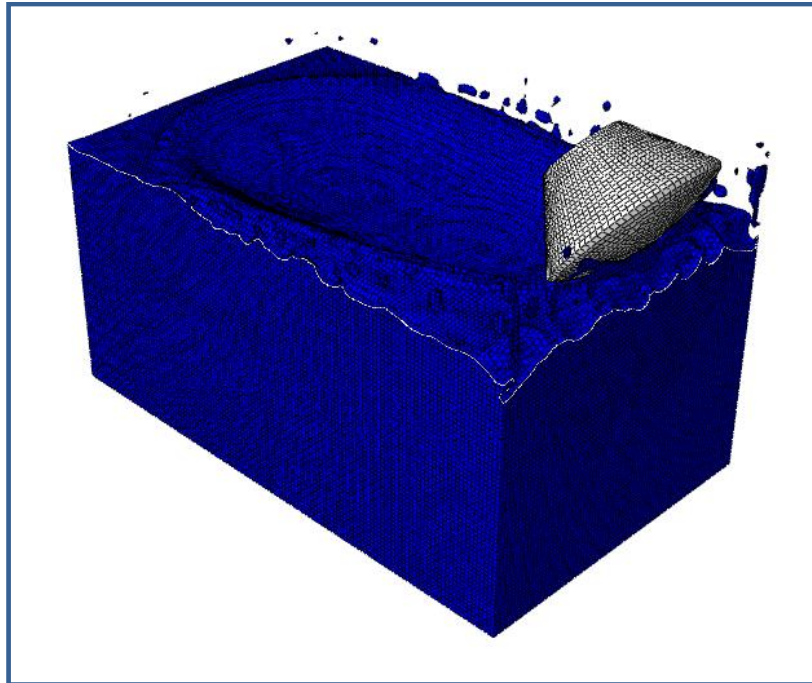


Figura 72. Posición final del Caso 5.

En la *Tabla 9* se muestra un resumen de los resultados obtenidos, es decir, tanto las aceleraciones como el error relativo cometido con el ensayo experimental.

Los resultados de las aceleraciones consiguen una buena aproximación al ensayo real también en este quinto caso. La aceleración normal es la que más se aleja con un error relativo inferior al 20%, mientras que las otras dos componentes ni tan siquiera alcanzan el 10%.

CASO		5
Velocidad Vertical [m/s]		9,27
Velocidad Horizontal [m/s]		14,94
Pitch [grados]		20
Experimental	Normal [g]	16,6
	Longitudinal [g]	5,7
	Angular [rad/s ²]	121
SIMULIA	Normal [g]	16,6
	Longitudinal [g]	7,5
	Angular [rad/s ²]	123,8
Simulación	Normal [g]	19,8
	Longitudinal [g]	5,22
	Angular [rad/s ²]	121,8
Error relativo [%]	Normal [g]	19,28
	Longitudinal [g]	8,42
	Angular [rad/s ²]	0,66

Tabla 9. Tabla de resultados del Caso 5.

Para terminar se van a graficar nuevamente las aceleraciones. Por un lado las obtenidas con la simulación de los cuatro primeros experimentos, y por otro el caso 5. (fig.73, fig.74 y fig.75).

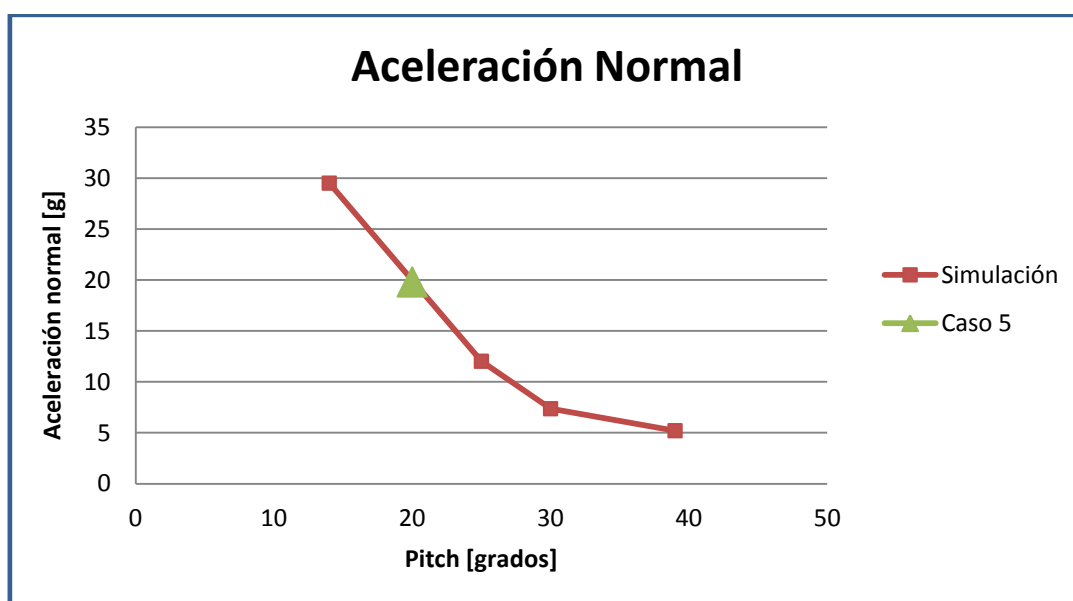


Figura 73. Aceleración normal de las cinco simulaciones.

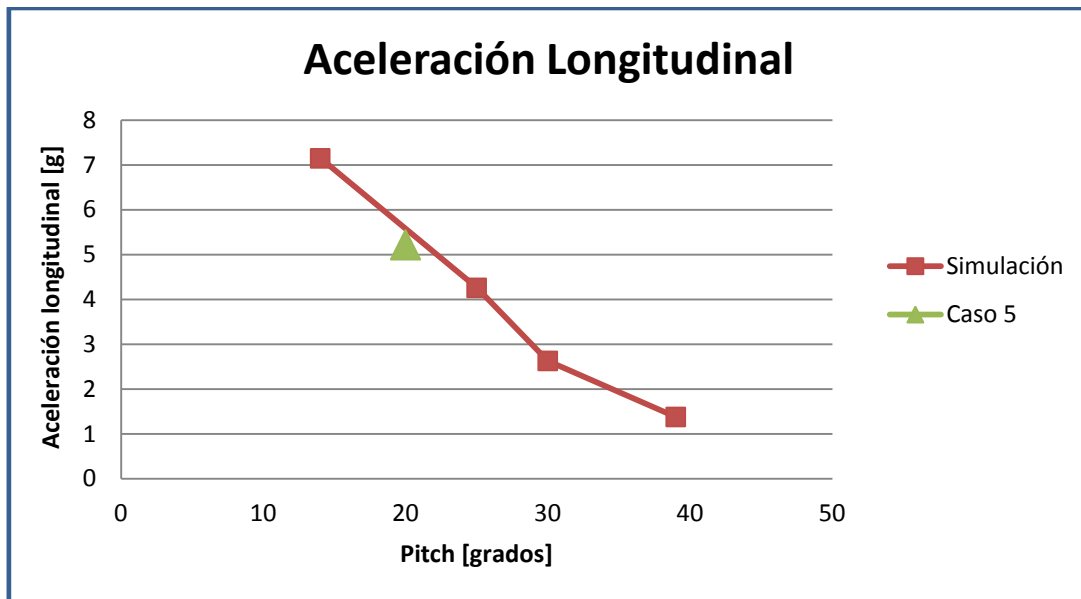


Figura 74. Aceleración longitudinal de las cinco simulaciones.

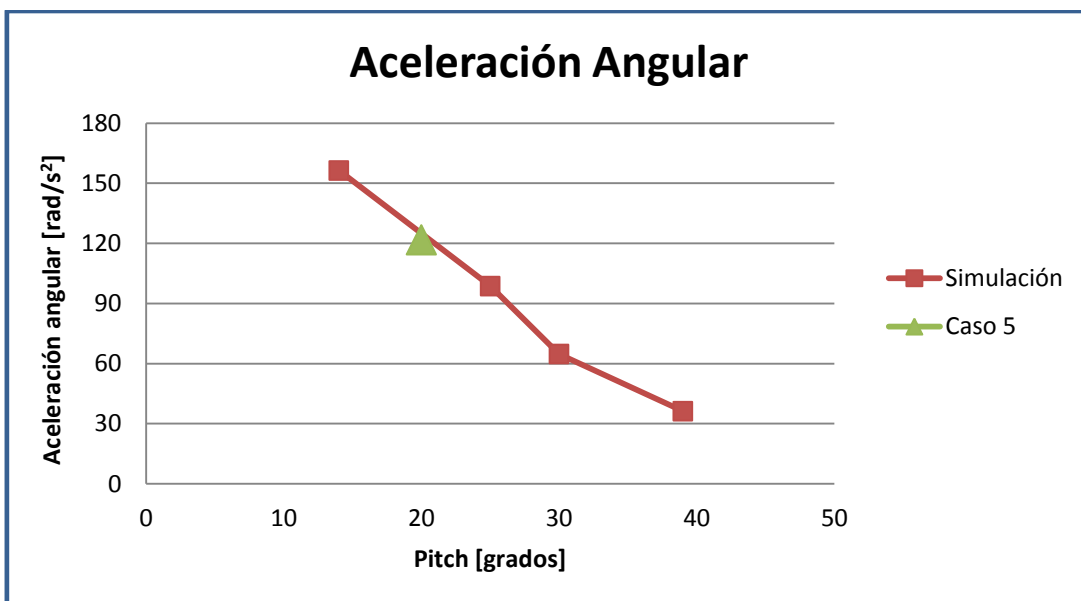


Figura 75. Aceleración angular de las cinco simulaciones.

Se puede ver en los tres gráficos como la ubicación del caso 5 está perfectamente alineada con los cuatro ensayos verticales. Por tanto la presencia de una componente horizontal en la velocidad no altera las aceleraciones que sufrirá la cápsula.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 CONCLUSIONES

Una vez finalizado el estudio se pasarán a exponer las principales conclusiones extraídas del mismo. En primer lugar cabe decir que los objetivos que se planteaban al principio del trabajo han sido resueltos con éxito. De este modo:

1. No todos los métodos numéricos son adecuados para simular una interacción fluido-estructura, como así sucede con el Lagrangiano. Las deformaciones que sufre el fluido son tan grandes que la malla Lagrangiana se distorsiona en exceso y no permite el cálculo. Por el contrario el Euleriano y el ALE ofrecen unos resultados más que aceptables en este tipo de problemas, mientras que el método SPH, a priori, también parece ser válido; sin embargo el hecho de no poder paralelizar el problema ha impedido ver hasta dónde podía llegar.
2. Respecto a qué método es más apropiado para el problema de la cuña, cabe decir que entre el Euleriano y el ALE las diferencias en los resultados son pocas, pero sí en el tiempo de cálculo. Si ésta es una variable determinante del problema el método ALE será el elegido para resolver la interacción fluido-estructura.

Otra conclusión que se puede sacar es la importancia del mallado. Se ha demostrado como una malla más fina, especialmente en la zona de interés, consigue unos resultados más exactos. Sin embargo hay que buscar un compromiso entre el tamaño de malla y la mejora de resultados obtenida, pues el tiempo de cálculo crece exponencialmente cuanto más fina es la malla.

3. Por último, para resolver el problema de la cápsula Apollo se escogió el Euleriano debido a que el sólido se definiría como un cuerpo rígido y por tanto el tiempo de computación no iba a ser un problema. La decisión fue acertada, pues los resultados obtenidos estaban próximos a los experimentales y a los de la simulación de SIMULIA, quienes también emplearon el método Euleriano.

5.2 LÍNEAS FUTURAS

De cara al futuro resultarían interesantes las siguientes líneas de trabajo:

- Realizar un estudio pormenorizado del problema con el método SPH para poder ver las verdaderas posibilidades del método.
- Estudio de optimización del mallado Euleriano para reducir el tiempo de cálculo sin detrimento de los resultados.
- Realizar el estudio del amerizaje del Apollo con otros métodos numéricos (ALE y SPH) para poder contrastar los resultados con los obtenidos experimentalmente y con el método Euleriano.
- Aplicar otros códigos de elementos finitos para la resolución del caso de la cápsula Apollo.

CAPÍTULO 6

PRESUPUESTO DEL PROYECTO

6.1 PRESUPUESTO DEL PROYECTO

En este capítulo se van a desarrollar los costes aproximados que habría generado la realización profesional de un proyecto de estas características. En el presupuesto se incluirán los costes personales, materiales, así como indirectos [16].

En cuanto a los costes personales se supondrá un salario de ingeniero por mes de 1700 euros. Como la dedicación diaria no ha sido de 8 horas se supondrá un 60% de la jornada laboral completa durante un tiempo aproximado de 7 meses.

En cuanto a los materiales utilizados se considerará un ordenador y la licencia de Abaqus. Para obtener los costes imputables al proyecto se aplicará la siguiente fórmula de amortización de los mismos.

$$\frac{A}{B} \cdot C \cdot D$$

Donde:

- A = nº de meses desde la fecha de facturación en que el equipo es utilizado.
- B = periodo de depreciación (meses).
- C = coste del equipo.
- D = % del uso que se dedica al proyecto.

Se ha tomado como el período de depreciación de los equipos informáticos 60 meses, y en cuanto a la licencia de Abaqus 12 meses. Como % de uso dedicado al proyecto se han considerado las horas de trabajo, esto es el 60% de 8 horas, es decir, 4,8 horas diarias, que equivale al 20% del día.

Los costes indirectos se consideran un 20% de los costes personales y materiales del proyecto.

GASTOS PERSONALES					
Personal	Categoría	Dedicación [meses]	Coste/mes	Dedicación [%]	Coste Total [euros]
1	Ingeniero	7	1700	60	7140
GASTOS MATERIALES					
Equipo	Coste [euros]	% Uso dedicado al proyecto	Periodo de uso [meses]	Periodo de depreciación [meses]	Coste Total [euros]
CPU	1000	20	7	60	23
Licencia Abaqus	21500	20	7	12	2508

Resumen de costes	Euros
Personal	7140
Material	2532
Indirectos (20%)	1934
TOTAL	11.606

Tabla 10. Presupuesto del proyecto.

Por tanto el presupuesto total del proyecto asciende a la cantidad de ***once mil seiscientos seis*** euros.

CAPÍTULO 7

BIBLIOGRAFÍA DEL PROYECTO

7.1 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Abaqus 6.9 Documentation. SIMULIA.
<http://www.cadfamily.com/online-help/SIMULIA/Documentation/docs/v6.9/index.html>
- [2] Analysis User's Manual Volume 5: Prescribed Conditions, Constraints & Interactions. Version 6.7. SIMULIA.
- [3] "A three-dimensional parallel adaptive mesh refinement method for fluid structure interaction". Doctoral Thesis / Dissertation, 2009.
- [4] José Alfonso Artero Guerrero. "Técnicas empleadas en la modelización numérica de problemas de interacción fluido-estructura". Trabajo tutelado: Máster en Mecánica Estructural Avanzada.
- [5] Apuntes de Ingeniería Industrial de la asignatura "Cálculo de Máquinas". Capítulo 3: Método de los Elementos Finitos. Universidad Carlos III de Madrid. Curso 2011/12.
- [6] Jesús Pernas Sánchez. "Simulación numérica del impacto de un sólido contra el agua". PFC Ingeniería Industrial. Universidad Carlos III de Madrid.
- [7] J. T. Oden. "Some aspects of recent contributions to the mathematical theory of finite elements". Advances in Computational Methods in Structural Mechanics and Design, University of Alabama Press, Huntsville. 1972.
- [8] El-Mahdi Yettou, Alain Desrochers and Yvan Champoux. "Experimental study on the water impact of a symmetrical wedge". Fluid Dynamics Research. September 2005.
- [9] "Water Landing of Space Flight Re-entry Vehicles Using Abaqus/Explicit". Abaqus Technology Brief. SIMULIA. May 2011.
- [10] Sandy M. Stubbs. "Dynamic Model Investigation of Water Pressures and Accelerations Encountered during Landings of the Apollo Spacecraft". NASA Technical Note. September 1967.

[11] Albert Illera. "Fuerzas G". Julio 2011.

<http://xeneize.wordpress.com/2007/07/11/fuerzas-g-por-albert-illera/>

[12] "SpaceX Demonstration Mission". NASA.

http://www.nasa.gov/pdf/641019main_pk_overview.pdf

[13] "Wrapping up at Michoud Successful Parachute Test". NASA. Monthly Accomplishments April 2012.

http://www.nasa.gov/pdf/646091main_OrionMAR-Apr2012.pdf

[14] Hoja de características sensor de presión AB/HP.

http://stevenengineering.com/Tech_Support/PDFs/31DATI.PDF

[15] Hoja de características potenciómetro de precisión PT5A.

<http://www.intertechnology.com/Celesco/pdfs/PT5A.pdf>

[16] Plantilla presupuesto de Memoria de la Universidad Carlos III de Madrid.

[17] R. Panciroli, S. Abrate, G. Minak and A. Zucchelli. "Hydroelasticity in water-entry problems: Comparison between experimental and SPH results". Composite Structures, Volume 94, Issue 2, January 2012, Pages 532-539.